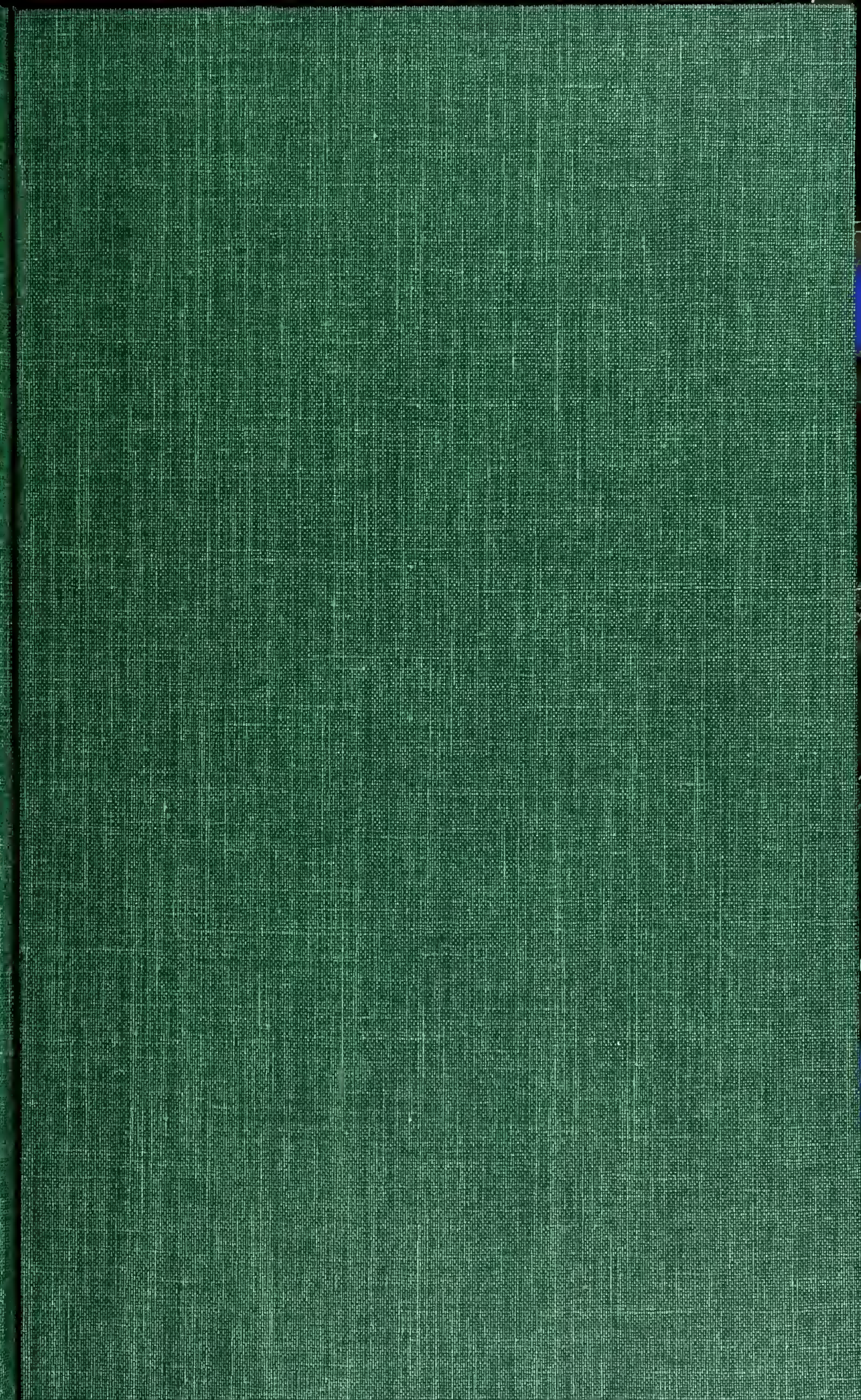


RÉSUMÉ DE L'HISTOIRE

DE

L'ÉLECTRICITÉ

ET

DU MAGNÉTISME,

ET DES APPLICATIONS DE CES SCIENCES

A LA CHIMIE, AUX SCIENCES NATURELLES ET AUX ARTS,

PAR MM.

BECQUEREL,

De l'Académie des Sciences de l'Institut de France,
Professeur-administrateur au Muséum d'histoire naturelle, etc.,

ET

EDMOND BECQUEREL,

Professeur au Conservatoire impérial des arts et métiers, etc.

PARIS,

LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES, FILS ET Cie,

IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, 56.

1858.

RÉSUMÉ DE L'HISTOIRE

DE

L'ÉLECTRICITÉ

ET

DU MAGNÉTISME.



Paris. — Typographie de Firmin Didot frères, fils et Ce, rue Jacob, 56.

RÉSUMÉ DE L'HISTOIRE

DE

L'ÉLECTRICITÉ

ET

DU MAGNÉTISME,

ET DES APPLICATIONS DE CES SCIENCES

A LA CHIMIE, AUX SCIENCES NATURELLES ET AUX ARTS,

PAR MM.

BECQUEREL,

De l'Académie des Sciences de l'Institut de France,
Professeur-administrateur au Muséum d'histoire naturelle, etc.

ET

EDMOND BECQUEREL,

Professeur au Conservatoire impérial des arts et métiers, etc.

PARIS,

LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES.

IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, 56.

1858.


YALE MEDICAL LIBRARY
HISTORICAL
LIBRARY

DISCOURS PRÉLIMINAIRE.

L'électricité est une science toute moderne; si du temps de Thalès, six cents ans avant l'ère chrétienne, on connaissait la propriété que possède l'ambre frotté d'attirer les corps légers placés à peu de distance, il faut franchir ensuite une période de plus de deux mille ans, pour trouver, en 1600, un ouvrage remarquable pour l'époque, le *de Magnete* de Gilbert, médecin anglais, ouvrage contenant les résultats d'expériences entreprises dans le but de montrer que cette propriété n'était pas aussi spéciale qu'on le supposait, puisqu'elle appartenait également à d'autres corps, et qu'elle éprouvait des modifications dans diverses circonstances. Ces résultats furent le prélude de travaux qui prirent de plus en plus d'extension et devinrent les bases d'une des branches les plus importantes de la physique.

Plus d'un demi-siècle après, Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, auquel on doit des recherches importantes sur différentes parties de la physique et la découverte de la machine pneumatique, construisit la première machine électrique (1). Il avait compris qu'en cherchant à augmenter l'intensité des effets, l'on pouvait espérer mieux connaître les propriétés de l'agent qui les produit; c'est, du reste, en suivant cette voie que l'on a été conduit souvent à des découvertes et à des principes nouveaux.

(1) *Experimenta nova ut vocant Magdeburgica*, etc. 1672.

Otto de Guericke observa de faibles étincelles électriques, qui furent obtenues avec plus d'intensité par Wall ; ce dernier compara de suite la lumière et le bruit de l'étincelle à l'éclair et au tonnerre ; Franklin ainsi que Dalibard, au milieu du dix-huitième siècle, en prouvant l'identité de l'électricité atmosphérique avec celle des machines, ne firent que démontrer ce qui était admis en principe par tous les physiciens, mais ce n'était encore là toutefois qu'une simple conjecture.

Après Otto de Guericke vinrent Boyle et Hawksbée ; l'ouvrage de ce dernier, qui parut au commencement du dix-huitième siècle (1), contient des recherches intéressantes sur la lumière électrique produite dans différents milieux. Si le dix-septième siècle avait vu s'étendre les propriétés d'un fait à peine connu auparavant, le dix-huitième devait voir s'accroître tellement le domaine de la science à laquelle ce fait avait donné naissance, que non-seulement on devait arriver aux lois des phénomènes de l'électricité statique, mais encore à la découverte de la pile, qui a donné à la science dont nous traitons une impulsion extraordinaire que rien ne saurait arrêter.

Plusieurs histoires de l'électricité ont été publiées depuis le dix-huitième siècle : la première qui soit venue à notre connaissance est attribuée à l'abbé Mangin, et date de 1752. Elle traite de l'histoire générale et particulière de l'électricité, et est divisée en trois parties : la première partie contient un exposé succinct des découvertes les plus importantes faites par Otto de Guericke, Boyle, Hawksbée, Gray, Dufay, Boze, Muschenbroeck, Winkler, Watson, l'abbé Nollet, Lemonnier, Ludolf, Jalabert, Hansenius, etc., et des premières découvertes de Franklin. La deuxième partie est relative aux principaux systèmes imaginés pour expliquer les phénomènes électriques par Otto de Guericke, Boze, Winkler, Boyle, Hawksbée, Gray, Watson, l'abbé Nollet, Boullanger, Bamacarre, Jalabert, etc. La troisième partie traite de l'action thérapeutique de l'électricité.

La théorie et les découvertes de Franklin ne furent connues en France qu'en 1756, par une traduction de Dalibard de let-

(1) *Physico mechanical experiments*, 1709.

tres de ce physicien à M. Collinson et en tête de laquelle se trouve une histoire abrégée de l'électricité; traduction qui fut accueillie favorablement.

Priestley publia, en 1767, l'histoire la plus complète de l'électricité qui ait paru jusque-là. Elle fut traduite en français, en 1771, par l'abbé Nollet et Brisson. Les travaux de Hawksbée, de Gray, de Dufay, du docteur Désaguliers, de Watson, de l'abbé Nollet, de Franklin, de Beccaria, de Canton, de Symmer, y sont présentés avec de grands détails. Il est à regretter que Priestley, tout en citant les recherches d'Œpinus, n'ait pas exposé les travaux de ce physicien avec des développements suffisants. Œpinus, en effet, fit paraître en 1759 un ouvrage dans lequel il appliqua le premier les mathématiques à l'étude de l'électricité et du magnétisme; il démontra au moyen des principes de l'attraction et de la répulsion les effets de cet agent, et contribua puissamment à introduire des idées justes dans cette partie de la physique; mais ce n'est que trente ans plus tard que l'abbé Haüy, en donnant un exposé de la doctrine d'Œpinus, répandit en France les idées du physicien de Saint-Pétersbourg..

Priestley, dans son ouvrage, indique les théories qui se succédèrent avant celle dite des deux fluides. Voici quelles sont les principales : Gilbert pensait que l'attraction électrique était produite de la même manière que l'attraction de cohésion; Boyle, qu'elle était due à une émanation glutineuse lancée par le corps électrique et qui, saisissant les petits corps placés sur sa route, les ramenait sur le corps électrisé. Ce n'était là que des théories ne reposant sur aucune base, mais il n'en fut pas de même de celles qui suivirent.

Otto de Guericke ayant découvert qu'un corps attiré par un autre électrisé en était repoussé aussitôt; Gray, vers 1727, que la transmission de l'électricité avait lieu d'un corps à un autre; Dufay, en 1733, que tous les corps étaient électriques par frottement, pourvu qu'ils fussent isolés, et qu'il existait deux électricités jouissant de propriétés contraires, sans dire toutefois qu'elles étaient produites simultanément dans le frottement, Franklin s'empara de toutes ces données, et, s'appuyant sur une idée

émise par Watson, avança que, selon toute apparence, l'électricité vitrée n'était que de l'électricité positive ou une surabondance de matière électrique, et l'électricité résineuse de l'électricité négative ou en moins. A l'aide de cette théorie, dite d'un seul fluide, il chercha à expliquer tous les faits connus ; Dufay partagea l'opinion de Franklin sur la cause des phénomènes électriques. Kinnersley fit ensuite, diverses expériences, qui attirèrent de nouveau l'attention des physiciens sur la différence entre les deux électricités vitrée et résineuse découvertes par Dufay.

L'abbé Nollet, ne partageant aucune des idées reçues, mit en avant la théorie des affluences et des effluences, en la fondant sur ce fait, que les corps non isolés, plongés dans des atmosphères électriques, deviennent électriques eux-mêmes. Cette théorie donna lieu à diverses discussions et fut renversée.

Jusqu'à Canton, on croyait que la même électricité était produite par le même corps, mais ce physicien démontra que l'espèce d'électricité dépendait de l'état de la surface du corps frotté, ou de celle du frottoir. Symmer, en reprenant ce sujet en 1759 inféra de plusieurs expériences nouvelles l'existence probable de deux fluides électriques non pas indépendants, mais toujours coexistants et agissant d'une manière opposée l'un à l'autre, en sorte que les deux électricités étaient produites en égale proportion dans l'acte de l'électrisation. La théorie des deux fluides fut alors généralement adoptée de préférence à celle de Franklin, surtout après que Cigna eut montré, en 1765, que deux rubans de soie, l'un noir, l'autre blanc, frottés l'un contre l'autre, s'électrisaient différemment, de manière à se neutraliser quand ils étaient en contact ; cependant rien ne prouve qu'il ne soit pas possible d'expliquer les différents phénomènes à l'aide d'un seul principe.

Priestley rapporte assez longuement, pour en combattre les conséquences, les expériences entreprises par Gray avec une balle électrisée posée sur un plateau de résine dans le but d'observer la révolution autour d'elle d'un corps léger suspendu au-dessus au moyen d'un fil tenu à la main ; révolution qui s'effectuait, disait-il, d'occident en orient, comme celle des

corps planétaires. Gray, n'ayant pu terminer ses expériences, pria, à son lit de mort, le docteur Mortimer de les continuer, en l'assurant qu'elles devaient le conduire à de grandes découvertes. Wheler démontra que les effets observés par Gray ne devaient pas être attribués à l'électricité, mais bien au désir de faire produire le mouvement d'occident en orient au corps léger suspendu au-dessus du corps électrisé. C'était là un des effets du pendule explorateur dont M. Chevreul a donné une théorie si claire et si nette, qui lui a permis de grouper autour d'un principe général une foule d'effets du même genre ; ce principe est l'intervention de nos propres organes musculaires dans des actes que nous exécutons à notre insu.

Priestley, dans son histoire, présage dans l'avenir de grandes découvertes en électricité ; voici en quels termes il s'exprime à cet égard :

« La physique a peu de branches, à mon avis, qui soient un « sujet si propre pour une histoire. Il n'y en a guère qui puis- « sent se glorifier d'un si grand nombre de découvertes, dis- « posées dans un si bel ordre, faites dans un si petit espace de « temps.....

« C'est surtout en électricité qu'il y a lieu d'espérer le plus « de faire de nouvelles découvertes; c'est un champ qui ne fait « que d'être ouvert. Le fluide électrique n'est pas un agent lo- « cal ni occasionnel sur le théâtre du monde. Les dernières dé- « couvertes font voir qu'il est présent et agissant partout, et « qu'il joue un rôle principal dans les plus grandes et les plus « intéressantes scènes de la nature.....

« L'électricité, ainsi que la chimie et la doctrine de la lu- « mière et des couleurs, paraît propre à nous faire connaître la « structure intérieure des corps, d'où dépendent toutes leurs « propriétés sensibles. En suivant donc cette nouvelle lumière, « on peut parvenir à étendre les bornes de la physique au delà « de tout ce dont nous pouvons maintenant nous former une « idée. On peut découvrir à notre vue de nouveaux mondes ; « et la gloire du célèbre Newton lui-même et de ses contempo- « rains peut être éclipsée par un nouvel ordre de philosophes, « dans un champ de spéculations tout à fait nouveau. Si ce

« grand homme pouvait revenir sur la terre, et qu'il vît les « expériences électriques actuelles, il ne serait pas moins étonné « que Roger Bacon l'aurait été des siennes. »

Priestley, mort en 1806, vécut assez pour voir se réaliser une partie de ses prédictions, puisqu'il a eu connaissance de la pile et de ses effets chimiques.

Depuis 1767, l'électricité a continué sa marche progressive; en 1790, parut la découverte de Galvani, qui a conduit à celle de la pile Volta, en attendant, préludait à son immortelle découverte en perfectionnant l'électrophore découvert per Vilke, et dotant la physique de l'eudiomètre et de l'électroscope condensateur; Coulomb découvrait les lois des attractions et répulsions électriques et magnétiques, ainsi que la distribution de l'électricité sur la surface des corps.

L'expérience fondamentale de Galvaui fut le sujet de vives discussions entre Galvani et Volta, auxquelles prirent part tous les physiciens et les physiologistes de l'époque, qui formèrent alors deux camps; tous les esprits se préoccupaient du galvanisme et de ses conséquences pour l'étude des phénomènes de la vie et même des phénomèmes naturels.

Bonaparte, général en chef de l'armée d'Italie, était du nombre de ceux qui attendaient beaucoup de l'électricité. En 1796 (1), les événements militaires ayant mis dans la nécessité de livrer au pillage la ville de Pavie, le général en chef donna l'ordre d'épargner la maison de Volta et celle de Spallanzani; dans la crainte de méprise de la part des soldats, les officiers entourèrent eux-mêmes ces deux maisons. Conduite digne des temps antiques, et qui honore autant Napoléon que les savants qu'il a protégés.

Deux ans après, le général Bonaparte, porté par sa fortune en Égypte, s'entretenait souvent sur son vaisseau, avec les savants qui l'accompagnaient, de questions scientifiques. Un jour il leur tint un langage qui rappelait celui de Priestley (2) : « Newton, en découvrant les lois de la gravitation universelle,

(1) Thiers, *Histoire de la Révolution française*, t. III, p. 383.
(2) Rapporté à l'un de nous par Costaz.

« a fait une œuvre de géant, mais celui qui trouvera celles de « l'attraction à de petites distances résoudra une question d'un « ordre plus élevé : dans l'attraction universelle, la matière est « soumise à une seule force ; dans l'attraction moléculaire, d'au- « tres forces interviennent, et probablement l'électricité. »

Napoléon, premier consul, assistait le 16 brumaire an IX, comme membre de la première classe de l'Institut, à la séance où Volta lisait la seconde partie de son mémoire sur la pile ; émerveillé de l'importance de la découverte, il prit la parole et engagea la classe à faire plusieurs expériences qu'il indiqua et qui furent faites plus tard; il proposa ensuite de lui décerner une médaille d'or qui lui fut accordée sur un rapport de M. Biot.

Peu de temps après, il fonda un prix de 3,000 francs (1) pour la meilleure expérience qui serait faite dans le cours de chaque année sur le fluide électrique, et un encouragement à celui qui, par ses expériences et ses découvertes, ferait faire à l'électricité et au galvanisme un pas comparable à celui qu'avaient fait faire Franklin et Volta, *et ce, au jugement de la première classe de l'Institut.* Dans la lettre qu'il adressait à ce sujet à la classe, on trouve ce passage : « Mon but spécial étant d'encourager « et de fixer l'attention des physiciens sur cette partie de la phy- « sique, qui est, à mon sens, le chemin des grandes découvertes. »

En 1808, Napoléon, empereur, fit répéter devant lui aux Tuileries, par Gay-Lussac et Thenard, l'expérience de la décomposition des alcalis au moyen de la pile, en présence de Monge, Bertholet, Chaptal et Corvisart ; il resta frappé d'admiration en voyant apparaître au pôle négatif les métaux des alcalis, et, se tournant du côté de Corvisart, il lui adressa ces paroles remarquables : « Docteur, voilà l'image de la vie : la colonne vertébrale « est la pile ; le foie, le pôle négatif ; la vessie, le pôle positif (2). » Cette idée servit de base à Wollaston pour établir une théorie des sécrétions, qui, si elle n'est pas exacte, a eu du moins l'avantage de lui faire faire, pour la vérifier, plusieurs expériences intéressantes.

(1) *Mémoires de l'Institut,* t. V, p. 197.

(2) Paroles rapportées à l'un de nous par Chaptal.

Revenons aux différentes histoires de l'électricité. En 1802, parut le premier volume (en deux parties) d'une histoire du galvanisme en deux volumes par Sue, et dont le dernier (également en deux parties) ne fut publié qu'en 1805. Il serait trop long de mentionner les noms de tous ceux qui ont développé, commenté la découverte de Galvani, puisque le nombre en dépasse cent. Nous nous bornerons à dire que l'on trouve dans cet ouvrage une foule d'indications précieuses sur les mémoires et publications qui parurent de 1791 à 1805 sur le galvanisme.

En 1833, M. A. Delarive inséra dans la *Bibliothèque universelle de Genève* une esquisse historique des principales découvertes faites dans l'électricité quelques années avant, ouvrage dans lequel ce célèbre électricien a fait preuve de cet esprit d'observation et d'analyse que l'on retrouve dans tous ses travaux. La première partie est consacrée à un aperçu sur l'histoire de l'électricité jusqu'en 1820, époque de la découverte d'Œrsted. La seconde partie est relative aux progrès qu'a faits l'électricité depuis 1820 jusqu'en 1833, et comprend les travaux d'Ampère sur l'électro-magnétisme, jusqu'à l'induction. Aucune des découvertes importantes faites pendant cette période n'a été omise. M. Delarive en a rendu compte avec une impartialité et une bienveillance qu'on ne trouve pas toujours dans les auteurs, et dont on ne saurait trop le féliciter. C'est dans cet esprit qu'il a analysé les travaux d'Œrsted, d'Ampère, d'Arago, de Davy, d'Herschel, de MM. Barlow, Faraday, Becquerel, Delarive, Henry, Moll, etc.

En 1834, l'année d'après, parut le précis historique de l'électricité et du magnétisme, formant le premier volume du *Traité expérimental d'électricité*, en 7 volumes, de l'un de nous. Dans cet ouvrage l'auteur, tout en donnant un précis historique de l'électricité, s'est attaché particulièrement à la partie électro-chimique dont il s'occupait le plus alors.

De 1833 à 1841, l'électricité ayant fait de nouveaux progrès, M. Delarive crut devoir publier en tête du premier volume des *Archives de l'électricité*, dont il était éditeur, une esquisse de l'état de nos connaissances en électricité, qu'il a tracé avec le

même esprit de justice que l'on retrouve dans son précédent ouvrage.

Nous mentionnerons encore l'*Histoire de l'électricité* de M. Antonio Carnevale-Arella, en deux volumes, publiée en 1839 à Alexandrie (Piémont); l'auteur ne fait nullement mention de l'électro-magnétisme ni de l'électro-chimie, et ne parle que des phénomènes électriques proprement dits.

Si l'on suit la marche de la science, on reconnait aisément que les faits les plus simples ont d'abord été découverts, mais que c'est par une étude approfondie et par des recherches persévérantes que l'on a été conduit aux principes et aux effets utilisés dans l'industrie; et même souvent c'est au milieu de travaux de l'ordre le plus élevé que des indications précieuses ont été données, indications qui sont devenues le point de départ de ces merveilleuses applications dont l'industrie est dotée depuis une vingtaine d'années. Témoin la télégraphie électrique : en 1820, Ampère, qui, dans l'espace de cinq mois, après la découverte d'Œrsted, posa les lois de l'électro-magnétisme, décrivit dans son premier travail tout théorique l'application qu'on pourrait faire des faits qu'on venait de découvrir à la télégraphie électrique. Ce n'est que de 1835 à 1840 que cette application fut faite, et à peu près sur quelques-unes des bases qu'il avait indiquées; elle reçut ensuite de grands perfectionnements et de grands développements. D'un autre côté, l'on doit reconnaitre que, si la science trace la route à suivre dans le domaine des applications, elle peut néanmoins recevoir d'utiles développements de ces applications elles-mêmes : c'est ainsi que l'établissement des câbles sous-marins a fait connaître de nouvelles conditions dans l'équilibre de l'électricité et dans sa propagation au travers des corps conducteurs.

L'Empereur Napoléon III, qui a fait lui-même une étude approfondie de la pile et de ses effets, comme le prouve le travail qu'il a fait à ce sujet en 1843 (voir page 209), prévoyant tout ce que l'on pouvait attendre de cet admirable instrument dans l'intérêt de l'industrie, a rendu le décret suivant, en 1852, pour exciter le zèle de ceux qui cherchent à en utiliser les effets :

« Considérant qu'au commencement du siècle, la pile de Volta « a été jugée le plus admirable des instruments scientifiques ; « qu'elle a donné :

« A la chaleur, les températures les plus élevées ;

« A la lumière, une intensité qui dépasse toutes les lumières « artificielles;

« Aux arts chimiques, une force mise à profit par la galvano- « plastie et le travail des métaux précieux ;

« A la physiologie et à la médecine pratique, des moyens dont « l'efficacité est sur le point d'être constatée ;

« Qu'elle a créé la télégraphie électrique ;

« Qu'elle est ainsi devenue et tend encore à devenir, comme « l'avait prévu l'Empereur, le plus puissant des agents indus- « triels ;

« Considérant, dès lors, qu'il est d'un haut intérêt d'appeler « les savants de toutes les nations à concourir aux développe- « ments des applications les plus utiles de la pile de Volta ;

« Décrète :

« Art. 1er. Un prix de 50,000 francs est institué en faveur de « l'auteur de la découverte qui rendra la pile de Volta applica- « ble avec économie,

« Soit à l'industrie comme source de chaleur,

« Soit à l'éclairage,

« Soit à la chimie,

« Soit à la mécanique,

« Soit à la médecine pratique.

« Art. 2. Les savants de toutes les nations sont admis à con- « courir.

« Art. 3. Le concours demeurera ouvert pendant cinq ans.

« Art. 4. Il sera nommé une commission chargée d'examiner « la découverte de chacun des concurrents, et de reconnaître si « elle remplit les conditions requises.

« Art. 5. Les ministres sont chargés, chacun en ce qui le con- « cerne, de l'exécution du présent décret.

« Fait au palais des Tuileries, le 23 février 1852.

« Louis-Napoléon. »

Quel est l'avenir réservé à l'électricité? Les découvertes depuis un siècle se sont succédé avec une telle rapidité qu'elles en ont fait une des branches les plus importantes, si ce n'est peut-être la plus importante de la physique, et, si sa marche progressive continue, nul ne peut prévoir les conséquences qui en résulteront, surtout pour l'étude de la constitution moléculaire des corps. Déjà un principe théorique paraît être établi aujourd'hui dans la science, c'est qu'une action dynamique se traduit toujours, soit par un équivalent d'électricité ou de chaleur, soit par un équivalent de travail moléculaire quelconque.

Quelle influence l'électricité exercera-t-elle aussi sur les progrès de la civilisation? On ne saurait non plus le dire : les houillères ne sont pas inépuisables, surtout en présence des besoins incessants de l'industrie; le défrichement des forêts suit l'accroissement de la population. On prévoit donc l'époque, quoique très-éloignée encore de nous, où le manque de combustible se fera sentir : qui sait si l'électricité n'interviendra pas pour y pourvoir? D'un autre côté, quand on voit l'électricité appliquée avec avantage aux moteurs d'une très-faible puissance, pour des travaux spéciaux, ne peut-il pas se faire qu'un jour d'autres sources d'électricité que celles que nous connaissons permettent de l'appliquer à des moteurs puissants et à d'autres besoins de l'industrie!

Dans le dix-neuvième siècle, les découvertes ont été si nombreuses et si suivies, que ce serait aujourd'hui un travail fort long d'en exposer l'histoire complète. Le résumé historique que nous publions comprend seulement l'ensemble des découvertes et des recherches les plus importantes, faites dans l'électricité et le magnétisme, non-seulement avant 1600, mais encore depuis cette époque. Nous avons suivi un ordre chronologique et didactique, en indiquant les ouvrages, recueils scientifiques, mémoires dans lesquels les découvertes sont exposées ou mentionnées, afin que le lecteur puisse y recourir au besoin.

L'ouvrage a été divisé en douze chapitres, afin d'éviter la confusion, et de classer à côté les uns des autres, chronologiquement, les faits du même ordre.

Le chapitre Ier comprend les principes de l'électricité jusqu'à

la découverte du galvanisme. Nous avons passé très-rapidement sur les effets de l'électricité statique, comme étant moins importants; l'histoire de Priestley, du reste, les résume très-bien et beaucoup plus complétement que nous n'aurions pu le faire en plusieurs pages.

Le chapitre II comprend l'histoire du galvanisme jusqu'à la pile, c'est-à-dire de 1790 à 1800;

Le chapitre III traite du magnétisme depuis l'origine jusqu'en 1820, époque de la découverte de l'électro-magnétisme.

Le chapitre IV renferme l'électro-dynamique et l'électro-magnétisme;

Le chapitre V, la continuation du magnétisme, depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle;

Le chapitre VI, le magnétisme terrestre;

Le chapitre VII, le dégagement d'électricité principalement depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle;

Le chapitre VIII, la propagation de l'électricité, et les recherches sur les piles voltaïques, depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle;

Le chapitre IX, l'électro-chimie, depuis 1820 jusqu'à ce jour;

Le chapitre X, les effets mécaniques et physiques de l'électricité depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle;

Le chapitre XI, les effets physiologiques de l'électricité et son emploi thérapeutique.

Le chapitre XII est consacré à l'historique des applications de l'électricité aux arts : ces applications, ayant reçu de grands développements depuis quelques années, rentrent, en ce qui concerne la partie technique, dans le domaine de l'industrie; c'est pour ce motif que nous n'avons parlé que des principes généraux sur lesquels elles reposent.

PRÉCIS HISTORIQUE

DE L'ÉLECTRICITÉ

DU MAGNÉTISME

ET DES APPLICATIONS DE CES SCIENCES

DEPUIS

LES TEMPS LES PLUS RECULÉS JUSQU'A L'ÉPOQUE ACTUELLE.

CHAPITRE Ier.

Période de l'antiquité jusqu'à la découverte de Galvani.

---

§ I. *Connaissances des anciens.*

Le pouvoir attractif de l'ambre ou succin (ἤλεκτρον) était connu des anciens; Thalès, qui vivait six cents ans avant l'ère chrétienne, en parle déjà dans ses ouvrages. Les faits dont l'explication était au-dessus des connaissances de ces temps reculés, et celui-là était du nombre, devenaient autant de mythes dont la poésie s'emparait : c'est ainsi que les Grecs, avides du merveilleux, crurent d'abord que cette substance avait une âme; mais cette croyance se perdit peu à peu quand on eut reconnu que plusieurs pierres précieuses

après avoir été frottées, jouissaient, comme l'ambre, de la propriété d'attirer les corps légers qu'on leur présentait (1).

Suivant Pline, l'ambre était recherché de son temps pour ses propriétés médicinales, propriétés auxquelles certaines personnes attachent encore quelque valeur, tant il est difficile d'extirper les anciens préjugés de la mémoire des peuples.

De son temps, on connaissait d'autres phénomènes dont l'origine était la même que celle du pouvoir attractif de l'ambre. On trouve dans les *Commentaires de César* le passage suivant (2) :

« Vers ce temps-là parut dans l'armée de César un phénomène « extraordinaire : après le coucher des Pléiades, vers la seconde « veille de la nuit..... les pointes des piques de la cinquième lé- « gion parurent s'enflammer. »

Tite-Live (3) fait mention de deux faits semblables. Les piques de quelques soldats en Sicile, et une canne que portait à la main un cavalier en Sardaigne, parurent en feu. Les côtes aussi furent lumineuses, et brillaient de feux fréquents.

On trouve dans Pline (4) le passage dont nous rapportons la traduction :

« Les étoiles paraissent tant sur terre que sur mer. J'ai vu une « lumière, sous cette forme, sur les piques des soldats qui étaient « en faction la nuit sur les remparts. On en a vu aussi sur les ver- « gues et autres parties des vaisseaux, qui *rendaient un son intel-* « *ligible* et *changeaient souvent de place* ; deux de ces lumières « prédisaient un beau temps et un heureux voyage, et en chas- « saient une autre qui paraissait seule et qui avait un aspect me- « naçant. Les marins appellent celle-ci *Hélène ;* mais ils nomment « les deux autres *Castor* et *Pollux*, et les invoquent comme des « dieux. Ces lumières se posent quelquefois sur la tête des hom- « mes, vers le soir, et sont d'un bon et favorable présage ; mais « ces choses sont au nombre des mystères respectables de la na- « ture. »

Pline rapporte encore des faits qui prouvent que les Étrusques avaient connaissance du pouvoir des pointes pour soutirer des nuages la matière de la foudre. Faire descendre le tonnerre ou la Divinité, chez les anciens, était la même chose.

« Dans le moment où Tullus Hostilius évoquait la descente de « la foudre par le procédé de Numa, mais maladroitement, il fut « frappé de la foudre. *Quod scilicet fulminis evocationem imita-* « *tum parum rite, Tullum Hostilium ictum fulmine* (5). »

On trouve encore dans Lucain ce passage remarquable, relatif au même sujet (6) :

.... Aruns dispersos fulminis ignes
Colligit, et terra mœsto cum murmure condit.
(LUCAN. *Pharsal.* 606.)

« Aruns », savant Étrurien, instruit dans les mouvements du tonnerre, « rassemble les feux de l'éclair dispersés dans l'air, et, au « milieu d'un bruit sinistre, les ensevelit dans la terre. »

Dans le sixième chapitre de la *Pharsale*, on trouve encore ce passage :

« Érichtho, la plus savante des Hémonides, qui sait, comme « Aruns, recueillir les feux de la foudre, les éclairs nocturnes : »

.... Nocturna fulgura captat.

Les anciens connaissaient aussi la propriété que possède la torpille de produire un engourdissement quand on la touche avec la main. Galien en fait également mention.

Plutarque dit que ce poisson fait éprouver un engourdissement aux pêcheurs par l'intermédiaire de leurs filets, et que si l'on verse de l'eau sur le corps de la torpille, la sensation se propage jusqu'à la main au moyen de l'eau tombante.

On se servait de la commotion donnée par la torpille comme moyen curatif dans la goutte et la paralysie, de même que l'on emploie aujourd'hui l'électricité dans des cas semblables, peut-être sans plus de succès.

On ne trouve rien, pendant toute la durée de l'empire romain, qui soit digne d'attirer l'attention des physiciens sur l'électricité. Les attaques réitérées des barbares et la lutte entre le paganisme et le christianisme, qui devint si vive que l'on quitta les sciences positives, quoique encore dans leur enfance, pour se livrer à des sujets purement spéculatifs, arrêtèrent non-seulement pendant longtemps les études scientifiques, mais finirent même par les anéantir presque entièrement pendant plusieurs siècles. Il faut aller jusqu'au dix-septième siècle pour commencer à trouver quelques recherches sur le pouvoir attractif de l'ambre et de plusieurs pierres précieuses.

§ II. *De l'électricité constituée en corps de science. — Travaux de Dufay, de Franklin, etc.*

Gilbert, médecin anglais, publia, vers le milieu du dix-septième siècle, un ouvrage remarquable pour l'époque, et ayant pour titre : *de Magnete*, dans lequel il fit connaître un grand nombre de corps jouissant de la même propriété que l'ambre ou succin ; il observa, en outre, que les effets étaient d'autant plus marqués que l'air dans lequel on opérait était moins humide ; il ne négligea enfin aucune des conditions qui pouvaient exercer une influence sur le dégagement de l'électricité.

Gilbert rassembla donc quelques faits qui, réunis, commencèrent à former un corps de doctrine qu'on appela *électricité*, dérivé du mot ἤλεκτρον, ambre. Lorsque nous parlerons du magnétisme nous reviendrons sur l'ouvrage de Gilbert ; on doit cependant remarquer que ce physicien est un des premiers dont les déductions théoriques aient été basées sur les résultats de l'expérience.

Vers 1670, Otto de Guerike, auquel on doit la machine pneumatique, construisit la première machine électrique, qui consistait en un globe de soufre ou de résine traversé par un axe horizontal, auquel on imprimait d'une main un mouvement de rotation, tandis que l'autre, qui appuyait dessus, produisait par son frottement un dégagement d'électricité plus considérable qu'on n'en avait encore obtenu.

Le docteur Wall (6) décrivit la lumière électrique : cette lumière et le craquement qui l'accompagne, dit-il, paraissent en quelque sorte représenter le tonnerre et les éclairs. C'est la première fois que l'on a comparé les effets de l'électricité à ceux de la foudre.

En 1675, Newton (7) trouva que l'attraction électrique se transmettait à travers le verre ; dans une des questions annexées à son *Traité d'optique*, il exprima l'opinion que la production de l'électricité pourrait bien être le résultat d'un principe éthéré mis en mouvement par les vibrations des molécules des corps (8). Ce grand homme a peut-être entrevu la véritable cause des phénomènes électriques.

Hawkesbée, vers 1709 (9), s'occupa des attractions et répulsions électriques : il observa le premier l'écoulement de l'électricité dans le vide ; il fit aussi connaître la lumière émise en agitant du mercure dans un tube de verre vide d'air. On lui doit aussi la substitution d'un cylindre en verre au manchon de résine ou de soufre dont se composait primitivement la machine électrique.

Gray (10), en 1727, aidé de Welher, établit la distinction entre les corps bons conducteurs, comme les métaux, et les corps mauvais conducteurs, tels que la résine, le verre, etc.

Six ans après, Dufay (11), prenant en considération la découverte de Gray, montra que tous les corps, même les métaux, peuvent devenir électriques, pourvu qu'ils soient placés préalablement sur un corps mauvais conducteur, qu'on appelle *corps isolant ;* mais la découverte qui rendit son nom célèbre (12) est celle des deux principes électriques dont la réunion, en quantités égales, forme le fluide neutre ou naturel. Il appela *électricité vitrée* celle qui est produite par le frottement des matières vitreuses, et *électricité résineuse* celle qui résulte du frottement des matières résineuses. Il prouva en même temps que les propriétés de ces deux espèces d'électricité sont de s'attirer l'une l'autre, tandis que les molécules de chacune d'elles se repoussent.

Les dénominations d'*électricité vitrée* et d'*électricité résineuse* ont été abandonnées depuis que l'on a reconnu que l'une et l'autre peuvent être produites indistinctement par le même corps, suivant l'état de la surface; on leur a substitué celles d'*électricité positive* et d'*électricité négative.*

A cette même époque, Dufay tira la première étincelle du corps de l'homme placé sur un tabouret isolant; ce fait inattendu, qui causa une surprise générale, prouvait seulement que le corps de l'homme, en raison des liquides qui font partie de son organisation, était conducteur de l'électricité.

En 1741, Boze (12'), professeur de physique à Wurtemberg, imagina de recueillir l'électricité dégagée par une machine sur des cylindres de fer-blanc suspendus à des cordons de soie ; ces cylindres furent les premiers conducteurs adaptés aux machines électriques.

Winkler (13), à peu près à la même époque, substitua un coussin à la main servant de frottoir, et, sauf quelques modifications secondaires, la machine électrique fut définitivement constituée.

En 1744 (14), on obtenait déjà des étincelles capables de tuer de petits oiseaux et d'enflammer l'éther et l'alcool.

En 1746, Cunéus de Leyde ou Muschenbroek (15) (on ignore lequel des deux) découvrit la bouteille de Leyde: électrisant un jour une bouteille de verre remplie d'eau distillée qu'il tenait à la main, et dans laquelle plongeait une tige de métal en communication avec une machine électrique, il voulut retirer cette tige avec l'autre

main, et ressentit aussitôt une vive commotion dans le bras et la poitrine. Cette expérience, qui excita un étonnement aussi général que celui qu'avait fait naître la première étincelle tirée du corps de l'homme, devint bientôt populaire, et passa du cabinet du physicien sur la place publique dans les mains du bateleur.

Les docteurs Watson et Bévis (15[1]) montrèrent qu'en entourant la surface extérieure de la bouteille d'une feuille de métal, la commotion était plus forte. L'abbé Nollet répéta le premier, en France, l'expérience de la bouteille de Leyde sur cent quatre-vingts gardes du corps qui se donnaient la main, dans la grande galerie de Versailles.

Si la découverte de Dufay avait jeté quelque lumière sur le dégagement de l'électricité en général, celle de la bouteille de Leyde fut le point de départ de nouveaux travaux, et notamment de recherches sur les phénomènes d'influence.

Le docteur Watson (15[2]) remarqua que la forme et la couleur de l'étincelle changeaient suivant la nature des substances d'où elles sortaient.

Plusieurs physiciens français et anglais (15[3]), frappés de l'expérience de Nollet, essayèrent, mais en vain, de déterminer la vitesse de l'électricité en faisant passer la décharge de la bouteille d'abord dans un fil de fer de 4,092 mètres de longueur, et ensuite dans la Tamise, sur une longueur de cinq à six mille mètres; mais ils ne purent jamais observer aucun intervalle de temps sensible entre le moment du départ de l'étincelle et celui de l'arrivée.

Électricité atmosphérique. Vers le milieu du dix-huitième siècle, alors que l'on découvrait les principales propriétés de l'électricité, on commençait déjà à être frappé de la ressemblance qu'il y avait entre les effets de la commotion de la bouteille de Leyde et ceux du tonnerre, pour désorganiser ou briser les corps, enflammer les matières combustibles, tuer les animaux. Cette analogie, dont Wall avait déjà parlé près d'un siècle auparavant, n'échappa point à Franklin, lorsqu'il eut imaginé la charge par cascade (16), au moyen de laquelle il fondit une feuille très-mince de métal, changea les pôles d'une aiguille aimantée, et imita un autre effet de la foudre, celui d'enlever toute la dorure d'un morceau de bois, sans l'endommager. Il compara le mouvement en zigzag de l'éclair à celui de l'étincelle électrique, et fit la remarque que la foudre frappait de préférence les objets les plus élevés et les plus pointus, comme les montagnes, les mâts de vaisseau, etc. Franklin avait tellement bien établi la

ressemblance qui existe entre ces deux modes d'action, qu'il ne restait plus qu'à recueillir la matière même de la foudre (16'), comme les anciens paraissent l'avoir fait par un procédé qui s'est perdu dans la nuit des temps.

A peine les idées du philosophe américain furent-elles connues en Europe, qu'elles attirèrent l'attention des savants, particulièrement de Dalibard, de Delor, de Mazeas, de Buffon et de Lemonnier, en France ; de Canton, de Watson, de Wilson et de Bévis, en Angleterre. C'est à cette époque que l'abbé Nollet (17) consignait le passage suivant dans son *Traité de physique :*

« Si quelqu'un entreprenait de prouver, par une conséquence « bien suivie des phénomènes, que le tonnerre est entre les mains « de la nature ce que l'électricité est entre les nôtres; que ces « merveilles, dont nous disposons à notre gré, sont de petites « imitations de ces grands effets qui nous effrayent, et que tout « dépend du même mécanisme ; si l'on faisait voir qu'une nuée « préparée par l'action des vents, par la chaleur, par le mélange « des exhalaisons, est vis-à-vis d'un objet terrestre ce qu'est le « corps électrisé en présence et à une certaine proximité de celui « qui ne l'est pas, j'avoue que cette idée, si elle était bien soutenue, « me plairait beaucoup; et pour la soutenir, combien de raisons « spécieuses ne se présentent pas à un homme qui est au fait de « l'électricité ! »

Il ne restait plus qu'à vérifier par l'expérience les prévisions de Franklin et de Nollet ; ce dernier, en 1746, avait déjà remarqué que des corps pointus placés à quelque distance d'un corps électrisé produisaient de la lumière. Franklin, en observant ce phénomène, découvrit, en 1750, le pouvoir des pointes (18).

L'expérience pour soutirer l'électricité d'un nuage orageux fut faite pour la première fois en France, le 10 mai 1752, par Dalibard (19), à l'aide de barres de métal isolées, terminées en pointe, et élevées dans un jardin de Marly (la ville) : l'une d'elles avait treize mètres de hauteur. Ces barres lui fournirent assez d'électricité pour charger des bouteilles de Leyde. A l'instant du passage du nuage, on entendit un coup de tonnerre, et dès lors l'identité de l'électricité et de la foudre fut complétement démontrée.

Franklin ignorait que cette expérience eût été faite en France : il attendait, pour la tenter, qu'un clocher qu'on élevait à Philadelphie fût terminé, afin d'y placer à une hauteur convenable la barre isolée qu'il se proposait d'employer ; mais il lui vint dans l'idée qu'un cerf-volant qui dépasserait les édifices les plus élevés

remplirait bien mieux son but. L'expérience fut faite en juin 1752, avec le plus grand succès (20).

Dalibard et Franklin ne furent pas les seuls qui soutirèrent la foudre des nuages. Romas, le 26 mars 1756 (21), obtint des résultats étonnants. Il avait fait construire un cerf-volant de 2m,33 de haut sur 1 mètre de large, qui fut élevé à la hauteur de 183 mètres, avec une corde isolée dans laquelle il avait entrelacé un fil de métal. Il s'établit entre la corde et la terre un courant d'électricité qui parut avoir de 0m,08 à 0m,10 de diamètre et 3m,33 de long.

Mais, si Franklin n'est pas le premier qui ait enlevé de l'électricité aux nuages, quoiqu'il ait préparé toutes les voies pour démontrer l'identité entre les effets de la foudre et ceux de l'électricité, à lui seul appartient la gloire d'avoir conçu l'idée de soutirer des nuages l'électricité à l'aide de barres métalliques terminées en pointe, pour préserver de ses terribles effets les bâtiments sur lesquels elles sont placées.

Tous les esprits étaient préoccupés de l'identité entre la foudre et l'électricité ; on chercha à expliquer le bruit du tonnerre, l'éclair qui le précède, l'odeur qui accompagne sa chute vers la terre, ainsi que les divers météores lumineux de l'atmosphère. Beccaria parvint à expliquer le bruit du tonnerre en prouvant d'abord que le fluide électrique déplaçait subitement l'air, et que ce déplacement, se communiquant aux parties environnantes, devait produire les retentissements qu'on entendait (23). L'appareil connu sous le nom de *thermomètre de Kinnersley* mit en évidence le refoulement de l'air. Il restait à expliquer l'odeur de soufre et de phosphore qui accompagne la chute de la foudre. On reconnut seulement l'analogie de cette odeur avec celle qui se développe dans les décharges ordinaires ; ce n'est que dans ces dernières années que l'on a pu résoudre cette question, sur laquelle nous reviendrons plus tard.

Les physiciens du dernier siècle ne se bornèrent pas à établir les rapports entre l'électricité et la matière même de la foudre ; ils cherchèrent d'où pouvait provenir cette quantité si considérable d'électricité qui se trouve dans l'atmosphère au moment des orages. Lemonnier, Beccaria, Franklin, Canton, Cavallo, Volta, De Saussure essayèrent tour à tour, mais en vain, de résoudre ce problème.

Cependant leurs recherches ne furent pas infructueuses pour la météorologie. Lemonnier observa le premier qu'il y avait presque toujours dans l'air de l'électricité, même lorsqu'il n'y avait aucune apparence d'orage (24). Pour étudier ce phénomène, il fit élever dans son jardin de Saint-Germain-en-Laye une longue tige de mé-

tal, aussi bien isolée que possible, avec laquelle il obtint des étincelles, non-seulement dans les temps d'orage, mais encore lorsque l'atmosphère était sans nuages. Il trouva, en outre, que l'électricité atmosphérique était soumise toutes les vingt-quatre heures à des variations régulières d'intensité. Beccaria (24[1]) essaya de trouver les lois de ces variations, et prouva que, dans toutes les saisons, à toutes les hauteurs et par tous les vents, l'électricité d'un ciel sans nuages est positive. Son appareil ne donnait aucun signe d'électricité par de grands vents, ou lorsque le ciel était couvert de nuages séparés et noirs, qui avaient un mouvement lent, ou bien dans la plupart des temps humides, mais sans pluie actuelle; enfin il reconnut que dans les mêmes saisons, lorsque le ciel était couvert, à la même hauteur, l'électricité n'était pas constamment positive; que, lorsque le temps était inconstant et variable, accompagné de bourrasques, de neige, de grêle, de pluie ou de brouillard, l'électricité était très-inconstante, tant pour la nature que pour l'intensité.

Théories imaginées pour expliquer les effets électriques. Gilbert pensait que l'attraction électrique était produite de la même manière que l'attraction de cohésion; Boyle, qu'elle était due à une émanation glutineuse lancée par le corps. Otto de Guericke ayant découvert qu'un corps attiré par un autre en était repoussé aussitôt; Gray, que la transmission de l'électricité avait lieu d'un corps à un autre; Dufay, que tous les corps étaient électriques par frottement pourvu qu'ils fussent isolés, et qu'il existait deux électricités douées de propriétés contraires, sans dire toutefois qu'elles étaient produites simultanément dans le frottement : Franklin (22) s'empara de toutes ces données, et, s'appuyant sur une idée mise en avant par Watson, avança que, selon toute apparence, l'électricité vitrée n'était que de l'électricité *positive* ou *en plus*, et l'électricité résineuse, de l'électricité *négative* ou *en moins*. A l'aide de cette théorie, dite d'un seul fluide, il chercha à expliquer tous les effets observés; Dufay partagea l'opinion de Franklin sur la cause des phénomènes électriques.

Kinnersley fit ensuite diverses expériences qui attirèrent de nouveau l'attention des physiciens sur la différence des deux électricités vitrée et résineuse découvertes par Dufay. L'abbé Nollet, ne partageant pas les idées reçues, mit en avant la théorie des affluences et des effluences, en se fondant sur ce fait que les corps non isolés, plongés dans une atmosphère électrisée, devenaient électriques eux-mêmes. Cette théorie donna lieu à de vives discussions et fut renversée.

Jusqu'à Canton on croyait que la même électricité était produite par le même corps; mais ce physicien démontra que l'espèce d'élec-

tricité dépendait de l'état de la surface du corps frotté ou de celle des frottoirs. La question en était là lorsque Symmer, en 1759, inféra de plusieurs expériences l'existence probable de deux fluides électriques, non plus indépendants, mais toujours coexistants, et agissant d'une manière opposée l'un à l'autre, en sorte que les deux électricités étaient produites en égale proportions dans l'acte de l'électrisation. La théorie des deux fluides fut alors établie, surtout après que Cigna eut montré que deux rubans de soie, l'un blanc, l'autre noir, frottés l'un contre l'autre, s'électrisaient différemment, de manière à se neutraliser quand ils étaient en contact.

Œpinus, qui le premier appliqua le calcul à l'explication des effets de l'électricité et du magnétisme, publia, en 1760, un ouvrage remarquable (31') dans lequel il rendit compte des phénomènes électriques d'après l'hypothèse de Franklin. Malgré cela, cette hypothèse n'a pas été généralement admise, et nous verrons dans un autre chapitre que l'hypothèse des deux fluides, adoptée par Coulomb, a servi de base aux recherches analytiques de Poisson.

Pouvoir conducteur. Gray, aidé de Welher, en 1728, avait bien prouvé que tous les corps ne jouissent pas de la même faculté pour conduire l'électricité ; que les uns, comme les métaux, sont bons conducteurs, tandis que les autres, tels que le verre, la résine, etc., sont de mauvais conducteurs ; mais ni Gray ni Welher ne cherchèrent à comparer la conductibilité de ces différents corps.

Priestley (25) entreprit de déterminer le pouvoir conducteur des métaux en faisant passer la même décharge à travers deux fils de métal différent, de même longueur et de même diamètre ; il répéta l'expérience jusqu'à ce que l'un des deux fils fût fondu et dispersé : celui-là était le moins bon conducteur qui se fondait le plus facilement. Il classa ainsi les métaux par ordre de conductibilité : or, argent, cuivre, laiton, fer. Ce procédé peu rigoureux ne lui permit d'obtenir que des résultats approximatifs.

Électromètres. Peu d'années après la découverte de la bouteille de Leyde, on sentit le besoin d'instruments propres à mesurer l'intensité de la charge. Le premier instrument de ce genre fut exécuté en 1749 par Darcy et Leroy (25'), mais son imperfection ne permit pas qu'il fût adopté. Nollet (26) en avait proposé un autre plus sensible et plus commode, qui se composait de deux fils de lin s'écartant par l'effet de la répulsion quand ils avaient été électrisés. Cavallo (27), en 1780, perfectionna cet électromètre ; il substitua aux fils de lin deux fils de métal qui portaient aux extrémités libres de petites balles de moelle de sureau. Volta se contenta de deux

pailles. De Saussure, en 1785, adapta à l'électromètre de Cavallo une tige métallique de plusieurs décimètres de long, dans le but d'étudier l'électricité atmosphérique. Deux ans après, Volta augmenta la puissance de cet appareil en fixant à l'extrémité supérieure de la tige métallique de de Saussure une simple mèche enflammée, pour échauffer l'air environnant, le rendre meilleur conducteur, et faciliter, par le renouvellement de l'air dû à l'ascension des gaz brûlés, l'écoulement de l'électricité. Enfin Coulomb construisit un des électromètres les plus délicats que l'on connaisse, et qu'il appela *électroscope*, en remplaçant le fil de métal de la balance de torsion par un fil simple de cocon.

§ III. *Des divers moyens de provoquer la production de l'électricité.*

Vers le commencement du dix-huitième siècle, on reconnut que le frottement n'était pas le seul moyen à l'aide duquel on provoque la puissance électrique dans les corps. Un minéral jouissant de propriétés attractives, quand il était chauffé, attira l'attention des physiciens. Ce minéral fut apporté par les Hollandais des Indes orientales, et surtout de l'île de Ceylan, où les naturels lui avaient donné le nom de *tournamal* ou *tire-cendre*, en raison de la propriété qu'il acquiert d'attirer les cendres quand on le jette au feu; il porte actuellement le nom de *tourmaline*.

Lémery (28) annonça pour la première fois, en 1717, quelques-unes des propriétés de cette pierre, qui jouissait, disait-il, après avoir été chauffée, de la propriété d'attirer et de repousser les corps légers qu'on lui présentait à la manière des corps électrisés.

Æpinus reconnut que ce phénomène était dû à l'électricité dégagée par la chaleur; Canton (29) remarqua qu'il n'avait lieu que par élévation ou abaissement de température, et qu'en brisant la pierre, quand elle était électrique, chaque fragment jouissait de la polarité électrique.

Les poissons électriques, qui avaient attiré l'attention des philosophes de l'antiquité, furent aussi, au commencement du dix-huitième siècle, le sujet des recherches des physiciens. On attribuait jadis les secousses vives que produisait la torpille, le gymnote et le silure, en les touchant, à une faculté engourdissante qui leur était propre. Réaumur, en 1714, essaya de donner une autre explication, sans faire intervenir l'électricité. Aussitôt que Muschenbroeck eut reçu la commotion de la bouteille de Leyde, il la compara à la secousse

que donne la torpille, sans pouvoir toutefois établir l'identité entre les deux phénomènes. On commença, d'après ce simple rapprochement, à appeler *poissons électriques* tous ceux qui donnaient la commotion.

En 1772, Walsh reconnut que l'on recevait la commotion de la torpille quand on la touchait avec un corps bon conducteur, et non avec un mauvais; qu'elle exerçait à volonté une action à distance sur les petits poissons dont elle voulait faire sa proie. Le même observateur, en expérimentant sur le gymnote (anguille de Surinam) avec un corps conducteur dans lequel se trouvaient des solutions de continuité, aperçut une lueur semblable à celle de l'étincelle électrique. A ces observations se bornent les recherches des physiciens du dernier siècle sur les propriétés des poissons électriques.

Un autre mode de production d'électricité attira vivement leur attention, nous voulons parler du dégagement d'électricité par influence, qui a lieu dans un corps conducteur isolé placé à peu de distance d'un corps électrisé. Les phénomènes qui s'y rapportent paraissent avoir été observés pour la première fois par les missionnaires de Pékin (30). Ils annoncèrent, en 1755, que l'électricité qui était ainsi développée par l'action d'un corps électrisé, se montrait ou disparaissait suivant que les corps étaient séparés ou en contact immédiat. Canton, Æpinus, Wilke, Franklin, Beccaria et Volta s'occupèrent de cette importante question. Nous devons cependant faire remarquer que Canton (31) avait parlé du dégagement d'électricité par influence dans un mémoire lu à la Société royale le 6 décembre 1753, deux ans, par conséquent, avant que les lettres des missionnaires parussent en France, et quelques années après la découverte de la bouteille de Leyde. Wilke et Æpinus se sont beaucoup occupés de cette partie de l'électricité.

Volta appliqua le principe du dégagement de l'électricité par influence à la construction de l'électrophore, appareil composé d'un gâteau de résine et d'un disque de cuivre, auquel est adapté un manche isolant pour le soulever sans le toucher. Il suffit de frapper la résine avec une peau de chat pour avoir une source continuelle d'électricité, en posant dessus le disque et le touchant du doigt avant de l'enlever. Volta ne tarda pas à transformer son électrophore en condensateur très-sensible, dont le principe avait été donné par Æpinus (31[1]); véritable microscope qui décèle la présence du fluide électrique là où on ne la soupçonnait pas jadis.

On avait remarqué souvent qu'un homme placé loin de l'endroit

où la foudre éclatait était exposé à être dangereusement blessé ou à perdre la vie, par suite de l'explosion : lord Mahon (32) rapporta cet effet, appelé *choc en retour*, à une action par influence.

Le 6 mars 1781, Lavoisier et Laplace annoncèrent à l'Académie des sciences que les actions chimiques donnaient lieu à un dégagement d'électricité ; mais ils ne firent paraître leur mémoire (33) que deux mois après. Ce mémoire avait pour titre ; *Sur l'électricité qu'absorbent les corps qui se réduisent en vapeur*. Ils firent voir que, dans la réaction de l'eau acidulée par l'acide sulfurique sur la limaille de fer, il se dégageait suffisamment d'électricité pour tirer une assez vive étincelle. La combustion du charbon leur donna, avec le condensateur, de l'électricité négative. Le titre du mémoire, l'exposé des expériences et les conséquences qu'ils en tirèrent prouvent que Lavoisier et Laplace attribuaient seulement l'électricité dégagée au changement d'état des corps. Les effets, au surplus, étaient tellement complexes que ces savants ne purent en déduire aucune loi.

De Saussure (34) s'occupa, de son côté, de la même question, mais, de même, sans pouvoir la résoudre ; dans ses expériences il y avait décomposition de l'eau, oxydation du fer et dégagement d'hydrogène, trois causes qui donnaient de l'électricité. En opérant avec une masse de fer chauffée au rouge qu'il projetait dans un vase de fer contenant une petite quantité d'eau, il obtint des effets électriques qu'il attribua à la volatilisation de l'eau précédée d'une ébullition.

Volta (35), en suivant à peu près le même mode d'expériences, a été conduit aux mêmes conséquences que Lavoisier et Laplace.

De Saussure (36) reprit les expériences de Volta, mais sans plus de succès, par la raison toute simple que plusieurs causes concouraient à la production des effets observés ; n'ayant pu obtenir d'électricité avec un linge mouillé isolé et placé devant un grand feu, il en conclut que l'évaporation sans ébullition ne donnait pas de l'électricité. La question qui avait occupé Lavoisier, Laplace, Volta et de Saussure ne fut résolue qu'après la découverte d'Œrsted, comme on le verra dans un autre chapitre.

§ IV. *Effets divers produits avec l'électricité.*

Quand on eut découvert la machine électrique, on obtint des étincelles capables d'enflammer l'éther, l'alcool, et des corps combustibles (37). Les effets de combustion furent plus marqués en em-

ployant la bouteille de Leyde et des batteries formées de la réunion d'un certain nombre de ces bouteilles.

Le docteur Watson, en 1764, annonça que, lorsque l'électricité traverse un fil de métal suffisamment fin, ce fil s'échauffe jusqu'à l'incandescence, et tombe ensuite en gouttes qui brûlent le papier.

Canton, ayant opéré sur un fil de laiton, reconnut sur le papier, avec la loupe, à l'endroit où les gouttes étaient tombées, des particules de cuivre arrondies, et ne put trouver aucune trace du zinc qui avait été évidemment brûlé.

Déjà, à cette époque, on commençait à rechercher l'influence de l'électricité comme force chimique; Franklin avait observé que le fer était rongé à force d'être exposé à des étincelles souvent répétées. Priestley, qui rapporte ce fait (38), ajoute: « N'est-il pas possible de « changer les couleurs bleues des végétaux en rouge, par quelque « application de l'électricité? Je crois avoir entendu dire qu'on l'a- « vait fait à Édimbourg. » Beccaria (39) parvint à fondre le verre et le borax avec des décharges électriques; il revivifia des métaux de leurs oxydes, et décomposa le sulfure du mercure. Il observa aussi le premier qu'en faisant passer des étincelles dans l'eau, entre deux fils conducteurs, il s'élevait des bulles de gaz. S'il eût recueilli ces bulles pour déterminer leur nature, il aurait découvert la composition de l'eau au moyen de l'électricité.

Priestley observa, la première fois qu'il fit usage d'une batterie électrique, qu'à chaque décharge il s'élevait une poussière fort noire, même lorsque la chaîne de cuivre à travers laquelle s'opérait la décharge était très-propre. Le papier sur lequel était posée la chaîne était marqué d'une trace noire, comme s'il eût été brûlé dans les endroits où les chaînons l'avaient touché. Ayant examiné avec soin la nature de la fumée noire, il reconnut qu'elle provenait du métal même, qui avait éprouvé cette modification, et la considéra comme une combinaison de la chaux du métal avec le phlogistique.

Cavendish, en 1781, produisit de l'eau en faisant détoner au moyen de l'électricité un mélange d'un volume d'oxygène et de deux volumes d'hydrogène. Il combina également, à l'aide de l'étincelle, les deux éléments de l'air, l'azote et l'oxygène, d'où résulta de l'acide nitrique dont il détermina la composition (39[1]). Volta, à peu près à la même époque, construisit la lampe à gaz hydrogène et l'eudiomètre, avec lequel il a analysé l'air au moyen de l'étincelle électrique (48).

Van-Marum (40) fit également des observations intéressantes tou-

chant le pouvoir chimique de l'électricité. Ses recherches se trouvent consignées dans un ouvrage en quatre volumes in-4°, publié de 1785 à 1798, et dans lequel il a donné la description d'une très-grande machine électrique qui se trouve encore dans le musée de Teyler, à Harlem. Il a observé avec cette machine :

1° L'inflammation de la poudre à canon, celle de l'amadou et d'autres substances inflammables. 2° Les effets produits en faisant passer la décharge dans différents gaz : l'oxygène acquiert une odeur très-forte, analogue à celle qui est produite dans la décharge au travers de l'air, première indication de l'ozone (40) ; l'hydrogène placé dans une éprouvette sur le mercure rougit un peu l'infusion de tournesol ; l'air ordinaire, placé sur une infusion de tournesol, diminue de volume, et la couleur de l'infusion devient rougeâtre (41). 3° La calcination des métaux dans l'air (oxydation) et dans différents gaz ; des expériences sur l'influence de l'électricité sur le pouls, sur l'irritabilité des plantes, sur la revivification des oxydes métalliques, etc.

A toutes ces indications se bornent les observations faites, dans le siècle dernier, sur l'action chimique de l'électricité à forte tension.

Beccaria avait avancé que l'électricité transportait avec elle les substances légères qui se trouvent sur son passage ; Priestley vérifia ce fait (41[1]). On doit aussi à ce dernier des expériences intéressantes sur les taches circulaires faites sur des lames de métal par de fortes explosions électriques (41[2]).

Nairne, en 1780, trouva que des fils métalliques traversés par des décharges étaient raccourcis (41[3]).

§ V. *Application de l'électricité à la physiologie et à la médecine.*

Les propriétés physiques, chimiques et mécaniques de l'électricité, qui se découvraient de jour en jour, frappaient tellement les esprits par leur singularité que de toutes parts on voulut appliquer cet agent à la végétation, à la physiologie et à la médecine.

On commença par chercher l'influence qu'il pouvait exercer sur la germination et la nutrition des végétaux. On avança que l'électricité atmosphérique agissait efficacement, et que, dans les années orageuses, les récoltes de céréales et de légumineuses étaient plus abondantes que dans les années ordinaires ; mais, si l'on eût tenu compte des effets produits par la température élevée de l'air et les vapeurs qui accompagnent toujours les orages dans les saisons où ils éclatent, on eût été plus circonspects dans les conséquences qui l'in-

rent déduites des observations. Les expériences de Bertholon et de Jalabert qui se rapportent à ce sujet, et qui concernent l'influence exercée par l'électricité sur la végétation, n'ont aujourd'hui aucune valeur scientifique.

Les applications à la physiologie et à la médecine furent très-nombreuses, tant on était persuadé que l'électricité était un principe universel; on doit faire remonter à la découverte de la bouteille de Leyde les premières expériences faites dans le but de déterminer l'influence de l'électricité sur l'économie animale.

Cette expérience produisit un effet tel sur ceux qui reçurent les premiers la commotion, que Muschenbroeck écrivait à Réaumur qu'il ne la répéterait pas, quand bien même on lui donnerait la France entière. L'impression morale qu'il éprouva fut telle, a-t-il dit, qu'il en perdit la respiration, et que deux jours après il était à peine revenu de l'émotion et du malaise qu'il en avait ressentis. Winkler assura aussi que la première décharge de la bouteille de Leyde lui avait occasionné une crampe dans tout le corps, et que son sang en avait été tellement agité que, craignant une fièvre chaude, il avait eu recours à des remèdes rafraîchissants. Les préjugés sur les dangers de l'expérience de Leyde s'étant affaiblis, on s'occupa de son application médicale.

Nollet paraît être le premier qui ait mis en pratique l'électricité en médecine; il commença par chercher les effets que produisait cet agent sur les liquides pendant une action prolongée: il observa qu'il accélérait leur évaporation, et que celle-ci était d'autant plus forte que les vases qui les renfermaient avaient une ouverture plus large et étaient formés de substances conduisant mieux l'électricité. Boze, dans le même temps, observait que l'eau électrisée sortait des tubes capillaires sous forme de rayons, au lieu d'en sortir goutte à goutte, comme lorsqu'elle ne l'était pas. Ces deux expériences furent regardées comme fondamentales par tous les physiciens qui s'occupèrent de l'application de l'électricité à la médecine. On se livra à des recherches touchant les effets produits par l'électricité sur les corps organisés; on tua des animaux, on fit périr des plantes, etc.

Lorsque l'on découvre dans la nature un agent énergique, l'homme qui souffre et celui qui cherche à apporter des adoucissements à ses maux essayent son action sur les organes malades, dans l'espoir d'arriver à une guérison vainement tentée par d'autres moyens. Il n'est donc pas étonnant que, dans le dix-huitième siècle,

tous les esprits préoccupés des singuliers phénomènes de l'électricité l'aient regardée, surtout à l'époque où tous ces phénomènes n'avaient pas encore été bien analysés, comme le feu élémentaire, comme la cause qui entretenait la vie dans les corps organisés. Ces corps cessaient-ils d'être dans leur état normal par un trouble quelconque dans le jeu des fonctions, il y avait diminution de fluide électrique ; dès lors il fallait leur en redonner une certaine dose. Une théorie aussi spécieuse, que l'enthousiasme avait fait naître, ne tarda pas à être renversée; mais, si l'électricité n'est pas la panacée universelle, il n'est pas dit pour cela qu'elle soit sans action sur l'économie animale. Cette action, quelle est-elle ? Nous l'ignorons encore.

Pour appliquer l'électricité à l'art de guérir, les physiciens se servirent de machines assez puissantes pour fournir un courant d'étincelles plus ou moins fortes, de bouteilles de Leyde de diverses grandeurs, d'un tabouret et d'excitateurs de diverses formes, qu'ils prônèrent comme des moyens infaillibles de guérison. Avec les bouteilles ils donnèrent des commotions ; avec les excitateurs ils tirèrent des étincelles de diverses parties du corps du patient. Ils administrèrent encore l'électricité sous forme de bains, et crurent reconnaître que l'électricité était de quelque utilité : 1° dans quelques contractions qui dépendent de l'affection d'un nerf ; 2° dans les entorses, relâchements, foulures, etc., lorsque l'inflammation est passée ; 3° dans les tumeurs indolentes ; 4° dans quelques cas de paralysie (42), etc. Les effets obtenus devaient-ils être attribués plutôt à la nature qu'à l'électricité ? On l'ignore.

On voit toutefois que les modernes emploient cet agent, la plupart du temps, à peu près dans les mêmes cas où les anciens se servaient de la torpille, tant il est vrai que l'homme, par un sentiment instinctif, cherche à appliquer des moyens semblables à des souffrances du même genre.

§ V. *Phénomènes naturels rapportés à l'électricité.*

Les phénomènes électriques, par leur singularité, prêtaient tellement à l'illusion que l'on cherchait, dans le siècle dernier, comme on le fait encore aujourd'hui, à rapporter à l'électricité les phénomènes dont la cause était inconnue. Nous citerons d'abord l'aurore boréale; les physiciens étaient partagés d'opinion sur son origine : les uns pensaient que ce phénomène était produit par la lumière

zodiacale (Mairan); d'autres eurent recours à un fluide imaginaire, le fluide magnétique, etc. Ces hypothèses furent abandonnées quand les propriétés de la lumière électrique furent mieux connues.

Eberhart, professeur à Halle, et Paul Frisi, à Pise, furent les premiers qui attribuèrent une origine électrique à l'aurore boréale, en s'appuyant sur les apparences lumineuses de l'électricité dans un air plus ou moins raréfié. L'air devenant moins dense en s'élevant au-dessus de la terre, les décharges électriques devaient produire les mêmes apparences que dans des milieux plus ou moins raréfiés. On considéra dès lors les aurores boréales comme des décharges électriques qui avaient lieu dans des régions élevées. Cette théorie fut adoptée et perfectionnée par Canton, Beccaria, Wilke, Franklin et d'autres physiciens (43).

On chercha aussi à expliquer, au moyen de l'électricité, les trombes, les tourbillons, la grêle, la phosphorescence, etc. Beccaria, qui avait étudié les propriétés lumineuses qu'acquièrent certains corps après avoir été exposés pendant quelques instants à la lumière solaire, reconnut que ces mêmes corps pouvaient également être influencés par la lumière électrique et devenir lumineux après avoir fait passer sur leur surface la décharge d'une bouteille de Leyde.

Canton s'occupa aussi de cette question; il étendit le nombre des substances qui devenaient lumineuses après la décharge électrique; il reconnut cette propriété dans le gypse et les coquilles d'huîtres. Ces expériences étaient d'un grand intérêt, mais elles ne démontraient que deux choses : 1° qu'il existait une certaine ressemblance entre la lumière phosphorique et la lumière électrique; 2° que les corps qui étaient phosphorescents spontanément sous l'influence de la lumière acquéraient aussi cette propriété par les décharges électriques.

§ VI. *Distribution de l'électricité sur la surface des corps, et lois des attractions et répulsions électriques. — Travaux de Coulomb.*

Parmi les physiciens qui se sont occupés de la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs, on doit distinguer en premier lieu Beccaria (44), qui a découvert, à l'aide de son puits électrique, que cet agent se transporte à leur surface, sans qu'il en reste la moindre trace dans l'intérieur. La capacité élec-

trique d'un corps, qu'il soit vide ou plein, est donc la même pourvu que la surface ne change pas.

Volta, en 1778, publia un travail dans lequel il prouva que, de deux corps de même surface, le plus long recevait la plus forte charge; il en conclut qu'il y avait un immense avantage à substituer aux larges conducteurs des machines électriques un système de très-petits cylindres, quoiqu'en somme ceux-ci ne formassent pas un volume plus grand.

Coulomb (45), de 1785 à 1787, fit plus pour la statique électrique que ceux qui l'avaient précédé. Il fut le premier qui porta dans les recherches sur l'électricité une précision mathématique dont on n'avait pas cru possible cette branche de la physique. Il découvrit d'abord les lois suivant lesquelles s'opèrent les attractions et répulsions électriques, lois qui sont les mêmes que celles qui régissent le mouvement des planètes autour du soleil. Muni d'une balance de torsion de son invention, il compara les intensités des forces électriques à diverses distances à des forces capables de tordre un fil de métal d'un certain nombre de degrés, et trouva ainsi qu'elles agissaient proportionnellement aux quantités d'électricité possédées par les corps, et en raison inverse du carré de la distance (46); il découvrit ensuite les lois suivant lesquelles l'électricité accumulée sur une surface se perd par le contact de l'air, et par les supports qui ne la retiennent qu'imparfaitement.

Étant parvenu, au moyen du calcul, à ramener la réaction électrique des corps à un état constant, malgré la déperdition continuelle qui s'opère par l'air et les supports, il chercha le mode de distribution de l'électricité entre les diverses parties d'un même corps, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Il démontra d'abord (47), comme l'avait déjà fait Beccaria, que l'électricité se portait en entier sur la surface des corps conducteurs, et qu'elle n'y était retenue que par la pression de l'air ambiant; il conclut de là qu'en admettant que l'électricité fût un fluide, celui-ci y formait une couche très-mince, dont il détermina l'épaisseur en différents points en touchant ces points avec un plan d'épreuve qu'il transportait ensuite dans la balance de torsion, pour déterminer la tension ou la quantité d'électricité enlevée.

Il appliqua ensuite sa méthode à la distribution de l'électricité sur des corps de forme cylindrique et conique, ainsi que sur des lames minces et isolées. Dans ces corps, la couche électrique n'a pas partout la même épaisseur; dans les lames très-minces, par exem-

ple, il y a accumulation d'électricité aux extrémités : il trouva dans ce fait une explication très-simple du pouvoir des pointes, car la tension électrique, étant très-grande à leurs extrémités, ne fait plus équilibre à la pression de l'air.

Les travaux de Coulomb sont empreints de l'esprit mathématique qui le guidait dans toutes ses recherches, et ont contribué à placer l'électricité au rang élevé où elle se trouve maintenant dans les sciences physiques.

Ici se termine la première période, comprenant tous les travaux faits jusqu'à Galvani, c'est-à-dire les observations relatives aux phénomènes d'électricité statique; ou, si l'on considère la science électrique en elle-même, abstraction faite de l'électricité atmosphérique et des effets physiologiques, on reconnaît quatre époques bien marquées dans les travaux des physiciens : ces époques correspondent, 1° à la découverte de la conductibilité par Gray; 2° à celle des deux électricités par Dufay; 3° à celle de la bouteille de Leyde, imaginée par Cunéus ou Muschenbroeck, et qui a eu pour conséquence la découverte de l'électricité par influence, et celle du condensateur ; 4° aux recherches de Coulomb.

Si l'on joint aux recherches de Coulomb les travaux mathématiques de Poisson, et ceux de plusieurs savants de l'époque actuelle, travaux dont nous parlerons plus tard, on a un ensemble assez complet de tout ce qui est relatif aux phénomènes d'électricité statique, dont nous venons d'esquisser l'histoire, et auxquels les découvertes récentes ont peu ajouté. Il semble que les physiciens aient été guidés par cette pensée, que l'électricité devait être assimilée à un fluide élastique, et de là les lois que l'on a déduites de son état d'équilibre. Les travaux de Galvani et ceux de Volta, comme on va le voir, en faisant connaître d'autres propriétés de l'électricité, ont ouvert une voie nouvelle, et deviendront la source de découvertes importantes dont on ne peut prévoir le terme.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE Ier.

(1) *Traité des pierres précieuses*, de Théophraste.
(2) *Commentarii Cæsaris, de Bello Africano*, XLVIII.
(3) Tite-Live, chap. XXXII.
(4) C. Plinii Secundi *Historiarum mundi*, lib. II.

(5) *Idem*, lib. II, chap. LV.
(6) Lucan. *Phars.*, I, 606.
(6¹) *Philos. Trans. abridg.*, v. II, p. 275.
(7) *Birch's Hist. of the Roy. Society*, vol. III, p. 260 et suiv.
(8) *Newton's Optic.*, in-8°, p. 314 et 327.
(9) *Physico mechanical experimente*, p. 75 et suiv.
(10) *Philos Trans. abridg*, vol. VIII, p. 9; et vol. IX, p 15 et suiv.
(11) *Histoire de l'Académie des sciences*, de 1733, t. LI.
(12) *Idem*, t. LI, p. 457 (1733).
(12¹) *Philos. Trans. abridg*, vol. VIII, p. 296 et suiv.
(13) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 129.
(14) *Trans. philos.*, vol. X, p. 271.
(15) Dalibard, *Histoire de l'électricité*, p. 33.
(15¹) *Philos. Trans. abrigd*, vol. X, p. 377.
(15²) *Idem*, *ibid*, p. 286 et suiv.
(15³) *Idem*, *ibid.*, p. 356, 349 et suiv.
(16) *Franklin's Letters*, p. 12.
(16¹) *Idem*, p. 14.
(17) *Leçons de physique* de l'abbé Nollet, t. IV, p. 314.
(18) Nollet, *Lettres*, vol. I, p. 126. — *Franklin's Letters*, p. 56.
(19) Dalibard, *Lettres de Franklin*, vol. II, p. 109.
(20) *Franklin's Letters*, p. 112.
(21) *Mémoires des savants étrangers*, t. II et t. IV, p. 514.
(22) *Franklin's Letters*, p. 15.
(23) *Beccaria*, *Lettere dell' elcctricismo*, p. 251 et suiv.
(24) *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1752, p. 233.
(24¹) *Philos. Trans.*, vol. XLVIII, part. I, p. 203, 577; t. XIII, p. 1, 87. — *Mémoires de l'Académie des sciences*, année 1752, p. 239. — *Lettere dell' electricismo*, p. 106, 114, 165, 166, 176, 347, 284, 288, 299 et suiv.
(25) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. III, p. 454.
(25¹) *Mémoires de l'Académie des sciences*, p. 63 et suiv.
(26) *Idem*, 1747, p. 130.
(27) Cavallo, *Traité de physique*, p. 129 et suiv.
(28) *Histoire de l'Académie des Sciences pour* 1717.
(29) Priestley, *Hist. de l'élec.*, t. II, p. 137. et suiv.
(30) *Éloge historique de Volta*, par M. Arago.
(31¹) OEpinus, *Tentamen theoriæ electricitatis et magnetismi*, p. 55 (1759).
(31) *Trans. philos.*, vol. XLVIII.
(32) Milord Mahon, *Principes d'électricité*, 1781, p. 69.
(33) *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1781, t. C, p. 292.
(34) *Relations de son voyage dans les Alpes.*
(35) *Journal de physique*, 1783.
(36) *Voyage dans les Alpes*, 2e vol.
(37) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. III, p. 116.
(38) *Idem*, *ibid.*
(39) *Beccaria*, *Lettere dell' electricismo*, p. 282.
(39¹) *Philos. trans.*, vol. LXXV, p. 372 et vol. LXXVIII, p. 261.

(40) *Description de la grande machine électrique de Harlem*, vol. I, p. 118
(41) *Idem*, p. 129.
(41[1]) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. III, p. 182.
(41[2]) *Idem, ibid.* p. 350.
(41[3]) *Philosoph. transact.*, 1780, t. LXX, p. 334 ; Van Marum, t. II.
(42) Mauduit, *Mémoire sur les moyens d'administrer l'électricité.*
(43) *Beccaria, Lettere dell' electricismo*, p. 272. — *Philosoph. trans.*, vol. XLVIII, p. 1 et 358.
(44) *Electricismo artificiale*, p. 186.
(45) *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1785 à 1787.
(46) *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1785, p. 569.
(47) *Idem*, 1787, 1788.
(48) Singer, *Traité d'électricité*, traduct. française, p. 136.

CHAPITRE II.

Découvertes de Galvani, de Volta, de Davy et d'autres physiciens, jusqu'en 1820.

---

§ I. *Découvertes de Galvani et de Volta.*

Après les travaux de Coulomb, la science électrique se trouvait dans un état stationnaire, lorsqu'une découverte inattendue vint lui imprimer une impulsion nouvelle.

Sulzer, vers 1782, avait consigné, dans sa Théorie générale du plaisir, un fait auquel on ne fit aucune attention, et qui devait se rattacher à la plus grande découverte des temps modernes, celle de la pile : « Si l'on joint, dit-il, par l'un de leurs bouts deux lames de métal, l'une de plomb, l'autre d'argent, et que l'on pose l'une d'elles sur la langue et l'autre au-dessous, on éprouve une sensation assez analogue à celle que produit le sulfate de fer, et l'on aperçoit en même temps une lueur légère. » Sulzer en tira la conséquence que la jonction des deux métaux opère une vibration de leurs particules, laquelle est transmise aux papilles nerveuses. Ce fait passa inaperçu jusqu'en 1790, époque où le hasard, mais un de ces hasards heureux dont l'homme de génie sait seul tirer parti, conduisit Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, à la découverte d'un principe fondamental qui devait exercer la plus grande influence sur le développement des sciences physico-chimiques. Laissons parler Galvani (1) :

« Je disséquai une grenouille, et la préparai comme l'indique la « figure (cette préparation est celle qui est encore en usage pour « exciter la grenouille), et, me proposant d'en faire tout autre chose, « je la plaçai sur une petite table où se trouvait une machine élec- « trique; elle n'était séparée du conducteur que par un petit inter- « valle. Une des personnes qui m'aidaient ayant approché légère- « ment, par hasard, la pointe d'un scalpel des nerfs cruraux de

« cette grenouille, aussitôt tous ses muscles se contractèrent de « telle sorte qu'on aurait dit qu'ils étaient agités par les plus fortes « convulsions ; une autre personne, qui faisait avec moi des expé- « riences sur l'électricité, remarqua que ce phénomène avait lieu « seulement lorsqu'on tirait une étincelle du conducteur de la ma- « chine. Tandis que j'étais occupé d'autre chose et que je réfléchis- « sais en moi-même, cette personne, étonnée de ce fait, vint aussi- « tôt m'avertir. Pour cela, je suis d'un zèle incroyable, et, brûlant « du désir de répéter l'expérience, je voulus mettre au jour la « cause inconnue de ce phénomène. En conséquence, je touchai « moi-même, avec la pointe du scalpel, l'un et l'autre des nerfs « cruraux, tandis qu'un de ceux qui étaient présents tirait une étin- « celle : le phénomène se présenta de la même manière ; je vis de « fortes contractions dans les muscles des membres, comme si « l'animal avait été pris du tétanos, et cela au moment même où « l'on tirait des étincelles. » La contraction produite était due évidemment à un effet de choc en retour.

Galvani, en variant les expériences, trouva que sur les animaux vivants les contractions étaient moins fortes que sur les animaux morts ; que, parmi les premiers, les plus propres à manifester les contractions étaient ceux dont l'âge était le plus avancé, les muscles plus blancs, etc. Mais la découverte la plus importante est celle qui est relative à l'influence des métaux différents dont il armait les muscles et les nerfs, et dont le simple contact suffisait pour produire les contractions. Cette expérience capitale a servi de point de départ à Volta pour découvrir la pile : mais à Galvani appartient l'honneur d'avoir posé le premier jalon.

Galvani, pour expliquer ce phénomène, imagina une théorie qui fut d'abord vivement combattue, abandonnée, puis reprise à la suite d'observations faites dans ces derniers temps : il supposa qu'il existait une électricité propre au système des animaux, laquelle passait des nerfs aux muscles par une loi analogue à celle de la décharge de l'électricité dans la bouteille de Leyde ; il admettait encore que l'électricité était sécrétée dans le cerveau, que le réservoir était les muscles, et que les nerfs ne servaient que de conducteurs.

Volta, déjà célèbre par la découverte de l'électrophore, de l'électromètre condensateur et de l'eudiomètre, combattit cette doctrine, et s'appliqua à démontrer qu'il n'existait pas d'électricité propre aux animaux, que ces derniers n'étaient que de simples conducteurs à cause de l'humidité dont toutes leurs parties étaient

imprégnées. Volta (2) exposa sa nouvelle doctrine comme il suit dans le Journal de Leipsig (il avait également fait sur cette question deux dissertations dans le Journal de Brugnatelli) (3) :

« Au commencement de cette année, je fus appelé à l'électricité, « à l'occasion des phénomènes vraiment admirables que le célèbre « Galvani, professeur à Bologne, a découverts et décrits, et par lesquels il paraît avoir démontré qu'il existe toujours dans les ani- « maux de chaque espèce une électricité quelconque, excitée « d'elle-même par la force de la vie dans les organes, et par eux- « mêmes, ou plutôt que le fluide électrique étant naturellement « rompu, ne reste plus dans les nerfs, mais existe dans quelques « mouvements continus ou dans l'effort qu'il fait pour se jeter sur « quelques parties, suivant qu'il est plus ou moins abondant. J'ai « d'abord répété toutes les expériences de Galvani ; j'en ai ensuite « examiné les résultats, ce qui m'a donné lieu de faire plusieurs « découvertes qui ont échappé à Galvani et aux autres physiciens « qui, après lui, ont couru la même carrière. »

Voici en quels termes Volta expose ses vues sur l'influence exercée dans les contractions par les effets électriques produits au contact de deux métaux :

« En traitant des principales questions, on n'a pas encore établi « si, dans les expériences galvaniques, les contractions très-fortes « excitées dans les muscles et les mouvements des membres, à « cause du double contact, d'abord sur les muscles, ensuite sur le « nerf de l'animal bien préparé et disséqué avec soin, mouvements « que personne ne doute devoir être attribués au fluide électrique, « qui se porte d'une partie à l'autre au moyen de l'arc conducteur ; « si, dis-je, les contractions ont lieu parce que ce fluide se dirige « de lui-même ou par la seule force des organes de l'animal sur « telle ou telle partie, et qu'on pourrait appeler une électricité vé- « ritable et propre à l'animal, ainsi que le prétend Galvani ; *ou bien « si cela arrive quelquefois, comme je l'ai vu dans plusieurs cas, « parce que les métaux employés dans les expériences, étant immé- « diatement appliqués sur les parties des animaux pleins de sucs, « peuvent par eux-mêmes et par leur propre vertu remuer, exciter, « chasser le fluide électrique qui était en repos*, en sorte qu'alors les « organes de l'animal n'agissent que passivement. Il n'y a pas long- « temps, à la vérité, que par des expériences indubitables j'ai dé- « montré que les métaux, et même les meilleurs charbons de bois, « étaient non-seulement les meilleurs conducteurs de l'électricité,

« mais même des excitants par le moyen du simple contact. C'est
« moi qui ai fait la découverte qu'avec les mêmes corps on peut
« troubler l'équilibre de la matière électrique et créer une nouvelle
« électricité. C'est réellement par eux-mêmes et par leur propre
« vertu en tant qu'ils poussent et forcent le fluide électrique à entrer
« dans la superficie qu'ils touchent, ou à en sortir, que les métaux
« et les charbons excitent cette faible électricité, qu'on ne peut en
« aucune manière découvrir avec les électromètres ordinaires,
« quelque bien faits qu'ils soient, et qui est assez puissante pour
« convulsionner les fibres nerveuses qu'elle rencontre et les muscles
« sans aucune friction ou autres moyens, pourvu que les métaux
« soient convenablement appliqués à l'eau ou à des corps imbus
« d'humeur aqueuse, tels que les nerfs et les muscles des animaux,
« soit vivants, soit récemment tués. »

Nous n'avons pu résister au désir de rapporter *in extenso* les passages de la dissertation dans laquelle l'immortel auteur de la pile expose, pour la première fois, ses vues sur la théorie du contact.

Volta démontra peu après que l'on peut faire contracter aussi bien la grenouille avec un métal placé entre deux liquides différents qu'avec deux métaux en contact avec les muscles et les nerfs (4). Une lutte s'établit bientôt entre Galvani et Volta ; on crut un instant le premier vainqueur, quand il prouva, aidé de son neveu Aldini, que l'arc métallique n'était pas nécessaire pour exciter les contractions, puisqu'on les obtenait encore dans une grenouille nouvellement préparée, en mettant en contact les muscles cruraux avec les nerfs lombaires ; mais Volta répondit sur-le-champ que l'effet produit était dû à l'hétérogénéité des liquides adhérant aux nerfs et aux muscles. Cette raison, qui était spécieuse, eut gain de cause auprès des partisans du contact. Ce fait néanmoins était important, en ce qu'il montrait que les muscles et les nerfs formaient un électro-moteur. Les physiciens se partagèrent en deux camps : les uns étaient pour le contact, les autres contre. Pfaff, professeur à Kiel, soutint la théorie du contact (5).

Wells observa qu'un seul métal ne pouvait produire les contractions lorsqu'il était très-pur ; mais que, lorsqu'il était frotté doucement par un de ses bouts sur de l'étain ou sur un corps quelconque, il devenait apte à produire seul les contractions.

Fabroni (6) attribua l'effet produit à l'action chimique des différents métaux. C'est le premier qui ait envisagé la question sous son véritable point de vue : il communiqua ses premières recherches à

l'Académie de Florence en 1792 ; mais les faits qu'il signala firent peu d'impression, tant la théorie du contact avait pris racine dans les esprits.

Fabroni avait remarqué souvent que le mercure coulant conservait longtemps son éclat tant qu'il était pur, mais qu'il s'oxydait promptement quand il était combiné avec un autre métal ; que des effets semblables étaient produits sur l'étain fin et ses alliages. En visitant le musée de Cortone, il avait vu des inscriptions étrusques gravées sur des lames de plomb pur, tandis que, dans la galerie de Florence, des médailles en plomb allié à l'étain, ou peut-être à l'arsenic, étaient réduites en poussière blanche. Ces observations et d'autres du même genre portèrent Fabroni à admettre que les métaux exercent, dans leur contact mutuel, une action réciproque à laquelle on doit attribuer la cause des phénomènes observés, et qu'il était à croire que quelques-uns des effets produits sur le corps animal par les armatures métalliques appliquées aux muscles et aux nerfs imprégnés d'humidité, pouvaient être attribués à une action chimique. Quant aux signes d'électricité recueillis par Volta en séparant deux métaux mis en contact, Fabroni regarda cet effet comme très-naturel, puisque les opérations chimiques sont accompagnées de marques sensibles d'électricité ; il ajouta cependant que la cause des contractions était due à l'action chimique, et non à l'électricité qu'elle produit, laquelle n'était qu'un effet secondaire qui, à la vérité, pouvait exercer une certaine influence sur la production des phénomènes. On voit par là que Fabroni n'avait fait seulement qu'entrevoir l'intervention de l'électricité dans les contractions.

Ayant mis dans des vases remplis d'eau des métaux de différente nature en contact deux à deux, il observa que le métal le plus oxydable s'oxydait visiblement à l'instant même du contact. Un mois après, l'adhérence avait été telle entre une plaque de laiton et une plaque d'étain, qu'il fallut employer un effort de deux kilogrammes pour les séparer. En recouvrant d'une légère couche d'huile l'eau du vase où étaient les métaux en contact, l'oxydation était très-faible et s'arrêtait à un certain point. Ces observations démontraient bien la nécessité d'une action chimique dans les effets galvaniques.

Valli (7) montra qu'on obtenait les contractions de la grenouille en prenant pour armatures des lames de plomb de diverses qualités ; que, lorsqu'une grenouille avait éprouvé des contractions pendant un certain temps, il suffisait de la laisser reposer quelques instants pour la mettre en état d'en produire de nouvelles ; il reconnut en-

core que les métaux peu ou point oxydables, tels que l'or et l'argent, ne produisaient que des effets très-faibles, et que, lorsque l'armature était restée quelque temps en contact avec les nerfs, tout mouvement cessait; mais qu'en changeant l'armature de place, les effets reparaissaient.

§ II. *Travaux physiologiques.*

Les expériences de Galvani, de Volta, de Fabroni, de Valli et d'autres physiciens, durent attirer l'attention du monde savant; aussi l'Institut national de France et l'École de médecine de Paris nommèrent-ils chacun une commission pour vérifier les faits observés.

La commission de l'Institut, composée de Coulomb, Sabatier, Pelletan, Charles, Fourcroy, Vauquelin, Guyton et Hallé, choisit pour son rapporteur Hallé, qui avait déjà rempli les mêmes fonctions auprès de celle de l'École de médecine (8).

La commission établit une distinction entre le fluide électrique et le fluide galvanique, et crut voir dans l'organisation animale un principe où réside l'essence des rapports mutuels du système musculaire et du système nerveux.

La disposition de l'arc excitateur la plus favorable aux contractions est celle où il entre trois pièces au moins de différentes natures, prises parmi les métaux, l'eau, les substances humides, charbonneuses ou animales, dénuées d'épiderme. Cet arc paraît être efficace lors même qu'il n'est formé que d'une seule espèce de substance convenable. *La moindre différence apportée dans la nature des parties suffit pour lui rendre l'efficacité* que lui aurait ôtée l'identité des substances. L'influence galvanique paraît s'exciter par l'exercice, s'épuiser par la continuité du mouvement et se réparer par le repos. La commission reconnut que l'étincelle électrique suffit pour rétablir la susceptibilité des animaux épuisés par des expériences répétées. L'alcool et les dissolutions opiacées affaiblissent et éteignent la faculté contractile. Les muscles des animaux tués par des décharges électriques éprouvent un accroissement de susceptibilité galvanique, tandis que cette propriété subsiste sans altération dans les animaux asphyxiés par submersion dans le mercure, par le gaz hydrogène, etc., s'affaiblit après les asphyxies par l'hydrogène sulfuré, l'azote, l'ammoniaque, et s'anéantit dans des animaux suffoqués par le gaz acide carbonique. Tels sont les résultats principaux qui ressortirent du travail de la commission.

M. de Humboldt (9) publia un ouvrage en allemand sur le galvanisme; dans cet ouvrage se trouvent des faits intéressants, parmi lesquels nous citerons ceux qui suivent :

Désirant savoir si les mouvements musculaires et les sensations que le galvanisme produit se prolongent après que la chaîne a été fermée, il eut le courage de se faire appliquer deux vésicatoires sur chacun des muscles deltoïdes : l'une de ces plaies fut fermée avec une médaille d'argent, et l'autre avec une lame de zinc, et la communication fut établie entre les deux avec un arc de métal. Après un seul contact, les muscles de l'épaule et du cou se contractèrent alternativement, et il en résulta une cuisson ; il distingua très-bien trois ou quatre coups simples, et souvent deux de ces coups ne se faisaient sentir qu'après que le zinc avait été posé pendant quelque temps sur la peau mise à nu. Lorsqu'on eut répandu sur l'armature quelques gouttes d'une solution alcaline, l'excitabilité des organes fut considérablement augmentée, et les douleurs devinrent très-violentes.

M. de Humboldt a vu l'inflammation se développer dans une plaie de la main par l'application de l'irritation métallique ; il a constaté aussi ce fait sur lui-même à plusieurs reprises. Ayant appliqué deux vésicatoires sur les muscles deltoïdes et posé dessus des armatures après l'ouverture des vésicules, il en résulta aussitôt un nouvel écoulement de sérosité avec changement de couleur, douleur très-forte, rougeur et inflammation.

Achard de Berlin, ayant établi une communication entre la bouche et l'anus, avec du zinc et de l'argent (10), excita par ce moyen des douleurs dans le bas-ventre, augmenta l'énergie de l'estomac, et opéra un changement dans les évacuations alvines.

M. de Humboldt, considérant que tous les nerfs du tronc étaient excités dans cette expérience, employa l'irritation métallique pour rappeler momentanément à la vie de petits animaux très-irritables sur le point d'expirer.

§ III. *De la pile de Volta, et des premières observations sur son action chimique.*

La lutte continuait toujours entre les partisans de Galvani, ceux de Volta, et les physiciens qui attribuaient une origine chimique aux effets électriques de contact, lorsque, le 20 mars 1800, Volta (11) écrivit à sir Joseph Bank, président de la Société royale de Londres,

pour lui annoncer une de ces grandes découvertes qui impriment une direction nouvelle aux sciences. Cette découverte était celle de la pile, l'instrument peut-être le plus précieux que les sciences physiques aient produit, et auquel la reconnaissance publique a donné le nom de son immortel auteur.

Volta, qui s'était efforcé de prouver que le phénomène de Galvani était dû à l'électricité dégagée au contact des deux métaux, chercha les moyens d'en augmenter les effets au point de rendre sa véritable cause évidente pour tout le monde. Il découvrit qu'en multipliant des couples formés de disques de cuivre et de zinc soudés ensemble et les plaçant toujours alternativement, en les séparant par des corps humides, tels que des rondelles de drap humectées d'une solution saline, on obtenait aux deux extrémités de cette pile une tension électrique suffisante pour produire des attractions, des répulsions et des commotions semblables à celles que l'on obtenait avec la bouteille de Leyde. En général, l'électricité fournie par le zinc était positive, et celle du cuivre négative. Cet appareil différait d'une bouteille de Leyde en ce que celle-ci, une fois déchargée, ne donnait plus d'effet, tandis que la pile s'électrisait constamment elle-même, et que les effets se renouvelaient sans cesse pendant un certain temps, sans que l'on fût obligé de rien changer à la disposition des couples.

Volta, ayant remarqué que la pile perdait de son énergie à mesure que les rondelles humides se desséchaient, et, de plus, que la disposition en colonne avait des inconvénients, imagina l'appareil à couronnes de tasses, lequel fut remplacé par la pile à auges, dont il sera question plus loin.

Peu après on commença à observer les effets chimiques de la pile. Nicholson et Carlisle (12), en expérimentant avec une pile à colonne de sept petits écus et d'autant de pièces de zinc et de carton mouillé, reconnurent que la décharge électrique était transmise au travers des conducteurs liquides et arrêtée par les liquides mauvais conducteurs, et qu'il se manifestait une odeur particulière dans certains cas. Pour en connaître la cause, Nicholson plaça dans le circuit, entre le haut et le bas de la pile, un tube de verre rempli d'eau, qu'il mit en communication avec les deux pôles de la pile au moyen de deux fils de cuivre ; les deux extrémités du fil étant éloignées de six centimètres, il vit apparaître aussitôt un petit courant de bulles très-fines : ces bulles semblaient sortir de la pointe en communication avec la pièce d'argent, la pointe opposée se ternissait peu à

peu et indiquait une oxydation. En intervertissant les conducteurs, les effets étaient contraires. Le gaz était de l'hydrogène pur; l'eau avait été décomposée, l'hydrogène se dégageait au pôle négatif et l'oxygène au pôle positif, lequel gaz oxydait le cuivre.

Carlisle substitua des fils de platine aux fils de cuivre, et recueillit les deux gaz, qui se trouvèrent être dans les proportions de deux volumes d'hydrogène pour un volume d'oxygène. Peu après, Nichoson et Carlisle observèrent la décomposition électro-chimique des sels, avec transport de leurs éléments à leurs pôles respectifs

Cruikshanks (13) découvrit, dans le même temps, les mêmes effets.

Vassali-Eandi (14) décomposa l'acide nitrique concentré, ainsi que l'alcool.

Pendant que l'on découvrait, en Angleterre, les propriétés décomposantes de la pile, et que l'on jetait ainsi les bases de l'électro-chimie, Volta, voyant que la théorie qu'il avait donnée de la pile n'avait pas été bien comprise par tous les physiciens, vint à Paris, en 1801, pour l'exposer devant la classe des sciences physiques et mathématiques de l'Institut national. Il commença, le 16 brumaire an IX, la lecture d'un mémoire qui contenait le détail et le résultat de ses expériences sur le galvanisme, et la continua dans les deux séances suivantes : il mit dans tout son jour la théorie du contact, fondée uniquement sur l'électricité produite au contact de deux corps sans l'intervention d'aucune action chimique.

Le premier consul, qui se trouvait à la séance où Volta lisait la seconde partie de son mémoire, fut frappé d'étonnement en apprenant la décomposition de l'eau par l'action électro-chimique du courant. Après la lecture, il proposa plusieurs expériences, et demanda, entre autres, que l'on cherchât l'influence de la chaleur sur le passage de l'électricité à travers les métaux dans leurs différents états et les conducteurs liquides, etc., etc. ; ces questions furent résolues plus tard. Enfin, le général Bonaparte proposa de décerner une médaille d'or à Volta pour ses belles découvertes; une commission nombreuse fut aussitôt nommée par la classe pour lui rendre un compte détaillé de l'importante communication qu'elle venait de recevoir. Cette commission était composée de Laplace, Coulomb, Hallé, Monge, Fourcroy, Vauquelin, Pelletan, Charles Brisson, Sabatier, Guyton, et Biot, rapporteur. Ce dernier fit un rapport remarquable, dans lequel il définit nettement ce qu'on de-

vait entendre par force électro-motrice (15). Voici en quels termes il s'exprima à cet égard :

« Si deux métaux différents, isolés et n'ayant que leur quantité « d'électricité naturelle, sont mis en contact, on les retire du contact « dans des états électriques différents : l'un est positif, et l'autre né- « gatif. Cette différence, très-petite à chaque contact, étant successi- « vement accumulée dans un condensateur électrique, devient as- « sez forte pour faire écarter très-sensiblement l'électromètre. »

La commission proposa en même temps à la classe de décerner à Volta une médaille d'or, comme un témoignage de la satisfaction de la classe pour les belles découvertes dont il venait d'enrichir la théorie de l'électricité, et comme une preuve de sa reconnaissance pour les lui avoir communiquées.

Les phénomènes chimiques de la pile continuaient toujours à être l'objet des recherches les plus actives de la part des physiciens et des chimistes, qui regardaient déjà cet appareil comme devant leur révéler, un jour, une foule de faits précieux sur la composition et la constitution des corps ; aussi en varièrent-ils la forme et l'étendue, dans l'espoir d'arriver promptement à une énergie suffisante pour obtenir de grands effets de décomposition.

Napoléon s'était passionné pour le galvanisme ; il en faisait souvent le sujet de ses conversations avec les savants dont il aimait à s'entourer. Il avait prévu, dès la première découverte de Volta, tout le parti que l'on pourrait en tirer pour la philosophie naturelle. Il en donna la preuve dans la lettre ci-jointe, qu'il adressa au ministre de l'intérieur, laquelle fut transmise par ce dernier à l'Institut (classe des sciences) (16) :

« Paris, 26 prairial an X.

« J'ai l'intention de fonder un prix consistant en une médaille « d'or de 3,000 fr., pour la meilleure expérience qui sera faite « dans le cours de chaque année sur le fluide électrique. . . . .
. . . .

« Je désire donner en encouragement une somme de 60,000 fr. à « celui qui, par ses expériences et ses découvertes, fera faire à l'é- « lectricité et au galvanisme un pas comparable à celui qu'ont fait « faire à la science Franklin et Volta, et ce, au jugement de la « classe. Les étrangers de toutes les nations seront également admis « au concours, mon but spécial étant d'encourager et de fixer l'at-

« tention des physiciens sur cette partie de la physique, qui est, à « mon sens, le chemin des grandes découvertes. »

La classe des sciences accepta avec reconnaissance l'offre du premier consul, et le concours fut aussitôt ouvert: elle déclara qu'elle n'exigeait pas que les mémoires lui fussent directement adressés ; qu'elle couronnerait, chaque année, l'auteur des meilleures expériences qui seraient venues jusqu'à elle, et qui auraient fait avancer la marche de la science ; que le grand prix, enfin, serait donné à celui dont les découvertes formeraient dans l'histoire de l'électricité et du magnétisme une époque remarquable (*).

L'enthousiasme que Napoléon avait montré pour cet admirable instrument s'accrut encore quand on répéta devant lui l'expérience de la décomposition des sels avec la pile (16'). Il était entouré alors de Berthollet, Monge, Corvisart et Chaptal. Il fut frappé d'étonnement en voyant le transport des éléments des sels à leurs pôles respectifs. Après un instant de silence, se retournant du côté de Corvisart, son médecin, il lui adressa ces paroles remarquables : « Docteur, voilà l'image de la vie : la colonne vertébrale est la pile, « le foie le pôle négatif, la vessie le pôle positif. » Nous tenons ces détails de Chaptal. Quoique cette comparaison ne repose sur aucun fait, on ne peut s'empêcher de penser qu'il n'y ait des effets électro-chimiques produits dans les fonctions organiques. La même idée, au surplus, est venue plus tard à Wollaston, sans qu'il eût eu connaissance probablement des paroles de Napoléon.

Thenard et Hachette, en juin 1801, montrèrent les effets d'incandescence obtenus avec des piles à larges surfaces et produisant une grande quantité d'électricité avec une faible tension.

La même année, Tromsdorff (17) produisit des phénomènes de combustion remarquables avec une pile de cent quatre-vingts couples.

(*) Le prix annuel de 3,000 francs fut adjugé, la première fois, en 1806, à Erman, de Berlin, pour sa découverte des propriétés conductrices différentes que présentent certains corps pour les deux électricités.

En 1808, il fut décerné à sir Humphry Davy, pour les recherches consignées dans un mémoire ayant pour titre . *Backerian lecture on some chemical agencies of electricity,* ainsi que pour la décomposition des alcalis et la découverte du potassium et du sodium.

En 1809, il ne fut pas décerné de prix, et, en 1810, il fut partagé entre Gay-Lussac et Thenard, pour leurs recherches électro-chimiques.

Depuis 1810, ce prix annuel ne fut plus décerné, quoique jusque en 1815 l'annonce de ce prix fût insérée dans les programmes. Le prix de 60,000 fr. n'a jamais été donné.

Dyckhoff (18) forma une pile avec des couples de cuivre et de zinc séparés par une couche d'air. Dix couples produisirent, à l'aide du condensateur, sur un électromètre, le même effet qu'une pile de Volta composée de cinq couples.

Davy composa également des piles avec des éléments de diverses natures; il trouva que des combinaisons de plaques métalliques et de liquides différents pouvaient être rendues actives, non-seulement lorsque les métaux éprouvaient une oxydation, mais encore lorsqu'il se passait seulement un changement chimique dans quelques-unes de leurs parties. Il renversa à volonté les pôles d'une pile (19) et se servit à cet effet de l'appareil à couronnes de tasses : si l'on monte l'appareil avec des plaques de cuivre et de fer, et que l'on verse de l'eau dans les verres, le cuivre, suivant lui, dans son contact avec le fer s'électrise négativement et dégage de l'hydrogène; le fer s'électrise positivement et s'oxyde. Avec une dissolution de sulfure de potassium les effets sont inverses.

Davy chercha à prouver que ces résultats ne contredisaient en rien la théorie du contact; mais les raisons qu'il donna ne sauraient être adoptées aujourd'hui. L'inversion tient à ce que, dans le premier cas, le fer est le métal le plus oxydé, tandis que, dans le second, c'est le cuivre.

Ritter (20) composa un couple de charbon bien calciné et de peroxyde de manganèse, un autre de plombagine et de zinc, qui produit plus d'effet qu'un couple de zinc et d'argent.

La pile verticale de Volta présentant de grands inconvénients en augmentant le nombre des couples, Cruikshanks y remédia en rendant la pile horizontale et renfermant tous les couples métalliques verticaux dans une auge en bois.

Pepys (21) construisit un appareil très-énergique, composé de soixante paires de plaques carrées de zinc et de cuivre, de 6 pouces anglais de côté, distribuées en deux auges, suivant le procédé de Cruikshanks, mais avec des additions particulières : il obtint avec cette pile des effets de combustion très-remarquables. Des effets du même genre, mais sur une plus grande échelle, furent obtenus par MM. Pepys, Allen, Howard et Tilloch (22). Tout en s'occupant de modifier les piles, on cherchait aussi les causes qui influent sur leur énergie. Un grand nombre de faits démontraient tous les jours que la théorie de Volta avait besoin d'être modifiée pour être en harmonie avec les observations nouvelles.

Pepys (23) fit fonctionner une pile successivement dans l'air et

dans le gaz oxygène. Avec l'oxygène seul, l'énergie était considérablement augmentée. Dans l'air, l'action s'arrêta quand il n'y eut plus que de l'azote ; l'oxygène était toujours absorbé.

MM. Biot et Frédéric Cuvier (24) reconnurent que la pile avait une action propre et indépendante de l'air extérieur, qui peut cependant en augmenter la force dans certaines circonstances.

Dans un autre travail, M. Biot (25), en mesurant la tension électrique avec la balance de Coulomb, démontra que, bien qu'à la rigueur l'oxydation développe de l'électricité, les effets de cette cause n'étaient pas comparables avec ce que donne le contact des métaux sans cesse alimenté avec le sol. On voit par là combien la théorie du contact avait jeté de profondes racines dans les esprits, puisqu'on n'osait pas encore y toucher; on sait aujourd'hui que dans les piles de ce genre l'oxygène n'a d'action qu'au pôle négatif où le gaz absorbe l'hydrogène qui se dégage.

Après Fabroni, Wollaston (25') posa en principe que l'oxydation du métal était la cause principale de la production d'électricité dans la pile. Il démontra en premier lieu que l'action chimique de l'électricité fournie par les machines était la même que celle que l'on obtenait avec la pile; qu'il suffisait pour mettre ce fait en évidence de concentrer toute l'action décomposante en un seul point, en se servant de l'extrémité d'un très-petit fil métallique pour transmettre l'électricité. Il obtint ainsi, avec l'électricité des machines, la décomposition de l'eau et des sels métalliques; l'identité entre les deux espèces d'électricité fut ainsi démontrée. Wollaston alla même jusqu'à avancer que les effets électriques de frottement dépendaient également de l'oxydation; mais les expériences qu'il fit à ce sujet laissaient beaucoup à désirer.

Gautherot (26) s'attacha aussi à démontrer que la charge de la pile provenait d'une action chimique; dans une lecture faite à la Société philotechnique le 12 brumaire an IX, il réclama la priorité sur Wollaston.

Ritter publia en 1805, à Leipsig, un ouvrage (27) renfermant un grand nombre d'expériences sur la pile.

Il vit quelquefois une aiguille composée de deux petites lames, l'une de zinc et l'autre d'argent et librement suspendue, se placer dans le méridien magnétique, le zinc vers le nord et l'argent vers le sud, et dont les extrémités étaient faiblement attirées et repoussées par les deux pôles d'un aimant. Il obtenait probablement cet effet quand les deux lames étaient recouvertes d'une couche d'hu-

midité. S'il eût songé à analyser le phénomène, il aurait peut-être devancé Œrstedt et Ampère dans la découverte de l'électro-magnétisme. Ritter tira seulement de ses expériences la conséquence que la charge de la pile n'a lieu qu'autant qu'il y a réaction chimique, et qu'elle est d'autant plus forte que cette réaction est plus énergique.

Il a encore avancé que les acides et les alcalis donnent aux métaux des tensions électriques opposées, suivant que ces liquides sont très-concentrés ou étendus d'eau (28). Enfin il a conclu de ses recherches que toute oxydation par la voie humide avait toutes les conditions de la chaîne voltaïque ; mais l'explication qu'il a donnée de la charge de la pile est tellement obscure qu'il est difficile d'y trouver la véritable théorie.

Bucholtz publia un travail intéressant sur l'action chimique des chaînes électriques formées de dissolutions salines d'inégale densité superposées et d'une lame métallique (28')

Piles secondaires. L'étude des décompositions électro-chimiques conduisit à la construction des piles secondaires : Erman avait annoncé, et même Volta avant lui, que si dans une pile isolée on fait communiquer les deux pôles avec une bande de papier mouillé, chaque moitié prenait l'électricité du pôle avec lequel elle communiquait. Si l'on enlevait ce conducteur imparfait avec un tube de verre, l'équilibre ne se rétablissait pas instantanément ; l'une restait positive, l'autre négative. Cette distribution de l'électricité ne saurait exister dans une bande de papier humide : le bout en rapport avec le pôle positif se recouvre d'acide et de gaz oxygène, et l'autre d'alcali et de gaz hydrogène ; les quantités d'acide et d'alcali allant en diminuant depuis les extrémités jusqu'au centre, le bout acide devient positif, le bout alcalin négatif : telle est l'explication du fait observé.

La pile secondaire, imaginée par Ritter (29), est fondée sur des effets du même genre ; elle est formée de disques d'un même métal et de cartons humides ; inactive par elle-même, elle le devient quand ses deux extrémités ont été mises en communication avec les deux pôles d'une pile, et son action est d'autant plus forte que cette dernière est plus énergique. Les piles secondaires ne fonctionnent uniquement que par la réaction, les unes sur les autres, des substances gazeuses, acides et alcalines, déposées sur les faces opposées de chaque carton, par l'action décomposante de l'électricité.

Les physiciens de la période dont nous esquissons l'histoire

avaient remarqué que les bouts de fil de métal qui avaient servi à la décomposition de l'eau étaient polarisés, c'est-à-dire étaient aptes à former un couple voltaïque; cet effet était du même genre que le précédent. Œrstedt avait reconnu également qu'un conducteur métallique qui avait fait partie pendant quelques instants d'un circuit voltaïque jouissait de la propriété d'exciter la grenouille. Il en était de même, a-t-il dit, mais à un moindre degré, en faisant passer dans le fil la décharge d'une batterie électrique.

Piles sèches. L'expérience ayant prouvé qu'il fallait détruire le zinc dans les piles pour les faire fonctionner, on chercha néanmoins, mais en vain, s'il n'était pas possible d'arriver au même but sans employer de liquide. En 1803, Hachette et Désormes (30) remplacèrent le liquide dans les piles ordinaires par la colle d'amidon. Deluc trouva, en 1809, une combinaison de couples qui fonctionnaient en apparence sans l'intermédiaire d'un liquide. Son appareil consistait en une colonne formée de disques de zinc et de papier doré d'un côté seulement, entassés les uns sur les autres, le zinc en contact avec la face dorée. L'humidité suffisait pour charger la pile qui a été improprement nommée *pile sèche.* En 1812, Zamboni (31) apporta quelques perfectionnements à l'appareil de Deluc. Il entassa, comme ce dernier, en les pressant les uns contre les autres, des milliers de disques de papier dont l'une des surfaces était étamée et l'autre recouverte d'une couche très-mince de peroxyde de manganèse broyé avec un mélange de farine et de lait. L'humidité servait encore à charger la pile. La circulation de l'électricité étant très-lente, on ne put obtenir ni effets de décomposition, ni effets calorifiques, quoique ces appareils donnassent des étincelles avec un condensateur. Ces piles, qui cessent de fonctionner au bout d'un certain temps, quand le papier a perdu toute son humidité, sont de peu d'utilité, à raison de l'irrégularité de leur action et de la très-faible quantité d'électricité mise en jeu.

§ IV. *Continuation des effets calorifiques, chimiques et physiologiques de la pile. — Premières recherches de Davy. — Théorie de Grotthus.*

Depuis les premières observations sur les décompositions chimiques opérées avec la pile, on avait négligé l'examen des phénomènes de chaleur produite pendant les décompositions. Davy (32)

s'occupa de cette question, et préludait ainsi aux brillantes découvertes dont il devait enrichir plus tard les sciences physico-chimiques. Il s'attacha à déterminer l'action de l'électricité voltaïque sur la production de la chaleur, et les changements qu'elle occasionne dans différents fluides.

Fourcroy, Vauquelin et Thenard avaient prouvé qu'il vaut mieux employer, pour les phénomènes de chaleur, des batteries à larges qu'à petites surfaces; Davy se servit également d'une pile à grandes surfaces, qu'il chargea avec différents liquides : avec de l'eau pure les effets étaient très-faibles; ils étaient plus forts avec une dissolution de sel marin; plus forts encore avec l'acide nitrique, puisque la décharge était suffisante pour rougir un fil de fer d'un certain diamètre. Quand la batterie était en pleine activité et que le fil plongeait dans l'eau, celle-ci entrait promptementen ébullition.

En terminant les deux conducteurs plongés dans l'eau par deux petits morceaux de charbon bien calciné ou un morceau de charbon et un fil de métal, on vit une abondante production de gaz, et les extrémités du charbon parurent d'un rouge blanc quelque temps après le contact. Il obtint également des étincelles dans les acides nitrique et sulfurique. En prenant pour liquide intermédiaire l'alcool et l'éther, les gaz résultant de la décomposition étaient des mélanges d'oxygène et de gaz inflammable. L'incandescence du charbon dans le chlore fut maintenue au rouge blanc pendant près de deux heures; le volume du chlore diminua très-peu, et il se forma une quantité abondante de matière blanche sur le charbon qui paraissait être du chlorure de mercure. Ces expériences étaient déjà empreintes d'un certain caractère d'originalité, et on les répète aujourd'hui facilement à l'aide des piles à courant constant, dont il sera question plus tard.

Berzélius et Hisinger reprirent les expériences de Nicholson, Carlisle et Cruikshanks, en s'attachant surtout aux réactions produites sur les fils conducteurs plongeant dans des dissolutions. Avec de l'ammoniaque concentrée et des fils de fer, ils obtinrent de l'hydrogène au pôle négatif et de l'azote au pôle positif; une petite quantité d'oxyde de fer fut dissoute ; avec l'ammoniaque étendue, l'eau seule fut décomposée. En variant les expériences, ils arrivèrent aux conséquentes suivantes : 1° l'eau et les sels sont décomposés avec dépôt de leurs éléments à leurs pôles respectifs, ce que l'on savait déjà ; 2° la quantité de substances décomposées est en proportion de leur affinité et de leurs points de contact avec les con-

ducteurs; 3° les phénomènes de décomposition sont déterminés par l'affinité des parties composantes pour le conducteur, autant que ce dernier peut entrer en combinaison avec elles.

Brugnatelli trouva que le sang de bœuf, placé sur la lame positive, se décolorait et se coagulait, tandis qu'il prenait seulement une couleur noire au pôle négatif. Le lait se coagulait également au pôle positif et prenait une odeur acidule agréable, tandis que le pôle négatif se couvrait de sucre de lait. La salive ne donnait qu'un léger caillot au pôle positif. L'urine déposait de l'urée au pôle positif et du phosphate d'ammoniaque à l'autre pôle. Le blanc d'œuf se coagulait au pôle positif.

Larcher, Daubencourt et Zanetti (34) étudièrent également l'action de la pile sur la bile, l'urine, le lait et le sang. Aldini montra que l'on séparait de l'urine différents sels qui s'y trouvaient; que ce phénomène avait lieu en partie sur la bile; que le sang et le lait se coagulaient promptement quand ils étaient soumis à l'action de la pile; qu'en faisant passer la décharge à travers les glandes parotides, il en résultait une sécrétion salivaire.

Grotthus (34[1]), qui s'était beaucoup occupé de recherches électrochimiques, donna une théorie des décompositions opérées avec la pile, théorie qui est restée dans la science, et dont voici les bases : L'eau, ou une dissolution quelconque, soumise à l'action de la pile, est une véritable pile secondaire, en ce sens que tous les éléments se polarisent comme une bande de papier humide communiquant par ses deux bouts avec les pôles d'une pile; de même, l'eau pure contenue dans un tube recourbé et placée dans le circuit voltaïque conserve pendant quelque temps la faculté de faire contracter la grenouille. Cela posé, voici comment Grotthus explique la décomposition de l'eau : Considérons, dit-il, une molécule d'eau composée d'une particule d'oxygène et de deux particules d'hydrogène; à l'instant où l'action voltaïque commence, la polarité se manifeste entre les molécules élémentaires de l'eau : l'oxygène étant attiré par le pôle positif, et l'hydrogène par le pôle négatif, on est porté à croire que chacun de ces deux principes, au moment où le circuit est fermé, acquiert un état électrique contraire à celui du pôle qui l'attire; et comme le même effet se produit sur toutes les particules de l'eau, il en résulte qu'en les prenant deux à deux, les principes homogènes se repousseront, tandis que les principes hétérogènes s'attireront alternativement. A l'instant où l'oxygène passe à l'état de fluide élastique par l'attraction

du pôle positif, son hydrogène repousse, en vertu de cette électricité, l'hydrogène de la molécule d'eau voisine et se combine avec l'oxygène de celle-ci en même temps que la molécule d'hydrogène repoussée transmet son mouvement à la suivante; ainsi de suite jusqu'à la dernière particule d'hydrogène, qui prend l'état gazeux quand elle touche le pôle négatif. On explique ainsi pourquoi il n'y a que les molécules d'eau situées aux extrémités des fils conducteurs qui soient décomposées. Grotthus a comparé avec raison ce qui se passe alors à l'effet produit quand on fait frapper une bille d'ivoire suspendue par un fil sur une série d'autres billes également suspendues, et qui se touchent toutes : l'impulsion communiquée à la première est transmise successivement à toutes les billes intermédiaires jusqu'à la dernière, qui, ne pouvant la transmettre, est chassée avec une force égale à l'impulsion première.

Travaux électro-physiologiques et effets thérapeutiques de l'électricité. Après la découverte de la pile, on multiplia les expériences dans le but de démontrer qu'au moyen de l'électricité on pouvait reproduire les mouvements et les contractions dus à l'acte de la volonté, ainsi que ceux qui en étaient indépendants. Galvani expérimenta sur une tête de bœuf récemment tué avec une pile à colonne chargée avec l'eau salée. Une des oreilles fut mise en communications avec l'un des pôles, et l'autre avec un naseau. Aussitôt les yeux s'ouvrirent, les oreilles se dressèrent, la langue s'agita et les naseaux s'enflèrent.

Aldini montra ensuite que, pour obtenir les plus fortes contractions, il fallait établir l'arc des oreilles à la moelle épinière; dans ce cas les paupières s'ouvraient, le globe de l'œil roulait sur lui-même comme dans la plus violente fureur.

Le docteur Andrew Ure, en opérant sur le corps d'un pendu, immédiatement après l'exécution, avec une pile de deux cent soixante-dix éléments chargée avec de l'eau acidulée, un des pôles ayant été mis en communication avec la moelle épinière, l'autre avec le nerf sciatique, à l'instant même tous les muscles du corps se contractèrent de mouvements convulsifs. En faisant mouvoir un des conducteurs de la hanche au talon, le genou plié, la jambe fut lancée avec tant de violence qu'elle faillit renverser une personne qui avait essayé de prévenir l'extension. Le docteur parvint à imiter le jeu des poumons, à faire mouvoir les doigts et les muscles du visage, et à imiter le jeu des paupières. Tous ces mouvements étaient désordonnés et ne représentaient qu'imparfaitement ceux qui sont produits sous l'em-

pire de la vie. Rien de semblable n'avait lieu sur l'homme après la mort naturelle, les fonctions de vie s'éteignant peu à peu.

En même temps que l'on s'occupait de recherches physiologiques, on tentait d'appliquer le galvanisme à la médecine. Galvani fut un des plus ardents à se livrer à ces recherches. Suivant lui, dans la manière d'appliquer l'électricité au corps humain, il fallait avoir égard à trois circonstances principales : 1° à la force avec laquelle elle agit violemment sur l'économie animale, comme dans l'expérience de la bouteille de Leyde ; 2° à son action lente et successive, comme lorsqu'on administre des bains électriques ; 3° à l'espèce d'électricité que l'on retire du corps. Il s'attacha ensuite à démontrer que, dans les maladies convulsives, rien n'est plus important que de déterminer laquelle des deux électricités devait être employée ; que l'état électrique de l'atmosphère pouvait influer sur l'électricité animale : aussi recommandat-il, avant d'entreprendre le traitement, de reconnaître avec des électromètres l'état électrique des nuages. Suivant Galvani, le moyen préférable à tous les autres, dans l'application de l'électricité négative, était de faire communiquer celle qui réside dans les muscles avec les nerfs de la partie malade. Il indique ensuite les avantages que l'on pouvait retirer de l'application de l'électricité atmosphérique. Il se trouva d'accord en cela avec Mauduit, qui avait annoncé que l'influence de l'électricité artificielle et atmosphérique était plus grande sur l'économie animale qu'on ne l'avait pensé (35). On n'en est pas plus avancé aujourd'hui à cet égard qu'il y a plus de cinquante ans.

Crèves s'est servi du galvanisme pour distinguer la mort vraie de la mort apparente ou l'asphyxie. Quand les fibres se contractent, c'est une preuve que l'irritabilité n'est pas entièrement détruite ; dans ce cas, on ne peut encore décider que l'homme soit véritablement mort.

Pfaff proposa le galvanisme dans la paralysie du nerf optique, comme Magendie l'a appliqué quelquefois avec succès il y a une vingtaine d'années.

Des expériences furent faites à l'École de médecine de Paris sur le traitement des maladies par le galvanisme ; la commission qui en rendit compte crut pouvoir conclure des observations dont elle fut témoin : que les effets de l'appareil voltaïque pénètrent et affectent l'organe nerveux et les organes musculaires plus profondément que les machines électriques ordinaires ; qu'ils provoquent de vives

contractions, des sensations fortes de picotements et de brûlures dans les parties que leur état maladif rend insensibles aux étincelles et aux commotions; que la durée de cette action est telle qu'elle semble autoriser l'espoir de posséder dans ce moyen un excitant efficace et capable de concourir avec succès au traitement des maladies. Ces conclusions, comme on le voit, ne donnnent rien de positif sur l'application de l'électricité à la médecine; mais elles laissent entrevoir la possibilité d'en obtenir de bons effets, quand il s'agit de stimuler un muscle ou un nerf qui est dans un état d'inertie, résultat qui est peut-être le seul qu'on ait obtenu jusqu'ici.

Grapen Gieser (36), collaborateur de M. de Humboldt, publia en allemand un ouvrage sur l'emploi du galvanisme dans le traitement de quelques maladies. L'auteur assure que le galvanisme peut, non-seulement servir à reconnaître les nerfs dans les tissus, mais encore à indiquer leur distribution superficielle. Il pense que les effets varient selon la nature des pôles mis en contact avec les parties malades. Si l'on prend, par exemple, une plaque de zinc et une plaque d'argent, que chacune soit mise en contact avec une plaie de vésicatoire, la plaie correspondante au zinc sera la première à fournir de la sérosité, et il se formera bientôt une escarre.

Le galvanisme, suivant lui, peut être utile dans les paralysies des extrémités, telles que la compression du cerveau; dans la faiblesse de la vue et dans la goutte sereine, due uniquement à l'inexcitabilité du nerf optique; dans les surdités dépendant de l'affaiblissement nerveux; dans l'enrouement et l'aphonie; dans la paralysie du sphincter de l'anus et de celui de la vessie. Il décrit ensuite les diverses manières d'appliquer ce moyen médicamenteux. C'est encore dans ces différents cas que l'on applique aujourd'hui l'électricité voltaïque.

Lebouvier-Desmortiers envisagea la question sous un autre point de vue : il s'attacha à signaler, dans un mémoire qu'il communiqua à la Société des observateurs de l'homme, le 28 floréal an IX, le danger du galvanisme dans le traitement des maladies. Il pose en principe qu'avant d'appliquer ce traitement aux corps vivants, il était nécessaire de reconnaître, par expérience, les altérations qu'il peut produire dans les différents principes de la vie; c'est une considération à laquelle les expérimentateurs qui l'ont précédé n'ont pas eu égard; on peut adresser le même reproche à la plupart des praticiens actuels. Il rapporte un fait remarquable, qui tend à prouver que les effets du galvanisme ont peu de durée : il appli-

qua deux fois sur ses tempes les conducteurs, et ressentit deux fortes commotions. « A la suite, je m'aperçus, dit-il, que mes « yeux, qui habituellement sont très-fatigués, et dans lesquels je « sens presque toujours de la chaleur et des tiraillements, n'éprou- « vaient plus ces petites incommodités. Mais cette espèce de gué- « rison subite ne dura guère, et fut bientôt suivie d'une sorte « d'étourdissement, d'un léger mal de tête, qui ne se dissipa qu'à « la fin de la journée (37). » Le même expérimentateur est le premier qui ait soumis les calculs urinaires à l'action du galvanisme. Un gravier rond très-dur et pesant un grain fut totalement dissous en vingt-quatre heures.

Un grand nombre de recherches furent faites sur l'application du galvanisme à l'art de guérir; mais le succès ne répondit pas toujours à l'attente des expérimentateurs.

§ V. *Découvertes de Davy, depuis* 1806.

Les travaux de Davy, avant 1806, n'avaient pas acquis l'importance qu'ils eurent ensuite, comme on en a la preuve dans les deux mémoires remarquables dont nous allons essayer de donner une idée (38). Si l'on ne trouve pas toujours dans ses expériences la rigueur mathématique que les physiciens exigent en général dans les recherches, s'il a négligé des faits de détail qui lui paraissaient de peu d'importance, on en est amplement dédommagé par les découvertes originales et capitales auxquelles il fut conduit, et les vues philosophiques qui en découlent. D'un autre côté, dans les travaux de Davy, on trouve toujours une grande pensée, et l'application suit la découverte d'un fait : c'est là le caractère du génie.

Les phénomènes de décomposition étaient encore enveloppés de beaucoup d'obscurité; on ne pouvait expliquer, par exemple, pourquoi, en opérant la décomposition de l'eau distillée avec la pile dans des vases de verre, on avait de la soude au pôle négatif et du chlore au pôle positif. Cette question avait besoin d'être étudiée de nouveau, et Davy en fit l'objet d'un mémoire (38).

Desormes (39) avait tâché de reconnaître par l'expérience la nature des substances qui se produisent dans l'eau distillée aux deux pôles d'une pile. Il annonça que c'était de l'acide chlorhydrique et de l'ammoniaque. Brugnatelli soutint la production d'une substance nouvelle, qu'il appella *acide électrique*. En Italie, on crut avoir produit du chlorure de sodium. Dès 1800, Davy avait annoncé qu'en soumettant à l'action de la pile, par le moyen de fils d'or, de

l'eau distillée contenue dans deux tubes de verre communiquant ensemble par une substance animale ou végétale humide, on avait une dissolution de chlorure d'or dans le tube positif; il s'assura bientôt après que l'apparence de l'acide chlorhydrique était due aux substances animales et végétales qui avaient été employées, puisqu'il n'obtint aucun effet en employant des filaments de coton lavés dans une faible solution d'acide nitrique.

Dans le cas où il obtenait beaucoup de soude, le verre paraissait fortement corrodé au point de son contact avec le fil métallique. Il en conclut, et avec raison, que la production de l'alcali était due à la présence de cette substance dans le verre. Il fut confirmé dans cette opinion, en observant que l'on n'obtenait la décomposition d'aucune substance saline en opérant dans des vases d'or. De semblables conclusions à l'égard de l'apparence de l'acide chlorhydrique avaient été tirées par la Société galvanique de Paris, le docteur Wollaston et MM. Biot et Thenard (40).

Davy opéra cette fois dans des petites coupes d'agate remplies d'eau distillée, qu'il mit en communication au moyen d'amiante très-blanche, lavée dans l'eau distillée, avec la pile, par l'intermédiaire de deux fils de platine. Les apparences acides et alcalines furent encore très-prononcées; c'était de la soude, de l'ammoniaque et de l'acide chlorhydrique. Il fut étonné de ce résultat, car il croyait avoir rempli toutes les conditions nécessaires pour éviter l'emploi de substances qui pouvaient contenir du sel marin. Il répéta un grand nombre de fois cette expérience, et se convainquit que le peu de matière saline qui existait dans les coupes d'agate avait fourni l'acide et l'alcali trouvés. S'étant débarrassé de cette cause d'erreur en opérant dans des vases d'or, il obtint encore des réactions acides et alcalines. Il vit alors clairement que l'eau elle-même était capable de fournir de l'alcali fixe; cependant cette eau paraissait pure en employant les réactifs ordinaires : il restait à savoir si la substance saline était transportée par la distillation, ou s'il fallait attribuer l'alcali au gaz azote, dont il existe une petite quantité dans l'eau exposée à l'air. Ayant fait évaporer de l'eau très-lentement dans un alambic d'argent, il resta une substance saline à la présence de laquelle il attribua les réactions acides et alcalines qu'il avait trouvées. Il soumit ensuite à l'expérience l'eau distillée, et cette fois il n'obtint aucune réaction acide ou alcaline: l'alcali provenait donc, soit des matières solides employées, soit de celles qui existaient dans l'eau.

En expérimentant avec des tubes de cire, Davy obtint un mélange de soude et de potasse; la substance acide se trouva être un mélange d'acides chlorhydrique et nitrique. Un morceau de marbre de Carrare, dans lequel on avait pratiqué une cavité, donna de la soude et de la chaux. Davy attribua leur présence à ce que le marbre de Carrare avait été exposé, à une des époques géologiques, à l'action de l'eau de mer. Plusieurs autres substances minérales lui donnèrent le même résultat, et il en conclut qu'il y avait peu de pierres qui ne continssent des matières salines en combinaison ou disséminées mécaniquement dans leur substance.

Davy n'a jamais opéré une décomposition chimique sans qu'il n'y eût production d'acide nitreux. L'alcali volatil paraissait aussi se former en très-petite quantité au commencement dans l'eau purifiée contenue dans les vases d'or; il expliqua la production de l'acide et celle de cet alcali par la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène, à l'état naissant, avec l'azote de l'air atmosphérique tenu en dissolution dans l'eau; en prenant effectivement toutes les précautions possibles pour que l'eau très-pure ne renfermât pas d'air, il ne retirait de l'eau chimiquement pure que de l'oxygène et de l'hydrogène.

Davy ayant constaté les effets de l'action électrique sur le verre, pour en retirer l'alcali qu'il contenait, voulut voir jusqu'à quel point le même mode d'action agirait sur les corps solides insolubles ou difficilement solubles dans l'eau. Il opéra, en conséquence, la décomposition de l'eau dans des coupes de sulfate de chaux, de baryte ou de strontiane cristallisés, de fluorure de calcium et d'autres substances également cristallisées. Les parties constituantes des corps furent séparées et déposées à leurs pôles respectifs.

Il étudia ensuite les diverses circonstances qui accompagnent les décompositions des combinaisons solubles mélangées ensemble et mises dans des coupes en agate réunies par des fils d'amiante, et en communication avec la pile au moyen de fils de platine. Les acides étaient déposés dans la capsule positive, et les bases dans la capsule négative. Il en était encore de même en expérimentant avec deux coupes remplies d'eau distillée, l'une de sulfate de chaux et l'autre d'agate, la première communiquant avec le pôle positif, et la seconde avec le pôle négatif. La chaux fut recueillie dans la coupe d'agate, et l'acide sulfurique resta dans celle de sulfate de chaux. Dans d'autres circonstances, il opérait avec trois capsules. Les deux capsules extrêmes ayant été remplies avec une dissolu-

tion de chlorure de sodium et la capsule intermédiaire avec une solution de sulfate d'argent, aussitôt que le circuit fut fermé, la soude commença à paraître dans le tube négatif et le chlore dans l'autre; mais le chlore, suivant Davy, en traversant la solution de sulfate d'argent, produisit un précipité pesant, et la soude un précipité léger; il en tira la conséquence que, lorsque les éléments des sels soumis à l'action de la pile rencontrent, sur leur passage, des corps avec lesquels ils peuvent former des combinaisons insolubles, ces combinaisons s'effectuent aussitôt et se précipitent. Aujourd'hui cette explication n'est plus admissible; les surfaces liquides servant de surfaces polaires comme les surfaces métalliques, quand il doit se former des produits insolubles, ces produits restent à la surface de contact des deux liquides, de même que les gaz se dégagent sur les lames décomposantes.

Davy soumit à l'expérience des substances animales et végétales qui donnèrent les mêmes résultats.

Dans un mémoire qui frappa vivement l'attention publique (41), Davy chercha à établir les bases d'une nouvelle théorie électro-chimique. Il tâcha d'abord de déterminer, par le moyen d'instruments très-délicats, l'état électrique d'une solution acide et d'une solution alcaline simple, isolées dans leur contact avec les métaux. Les résultats furent nuls; il n'en fut pas de même en expérimentant avec des substances acides et alcalines, sèches et solides. Ainsi, les acides oxalique, succinique, benzoïque, etc., parfaitement secs, dans leur contact avec le cuivre, prirent l'électricité négative, et le métal l'électricité positive. L'acide phosphorique solide, très-sec, se comporta de même par rapport au zinc. Avec la chaux sèche, la magnésie et la strontiane, le métal devint au contraire négatif. Dans aucun cas la potasse ne donna de résultat satisfaisant; des faits observés, il en déduisit les conséquences suivantes :

Dans les décompositions et les changements produits par l'électricité, les différents corps qui possèdent naturellement des affinités chimiques paraissent incapables de se combiner ou de rester en combinaison, lorsqu'ils sont mis dans un état électrique différent de celui qui leur est propre.

Parmi les substances qui se combinent chimiquement, toutes celles dont l'énergie électrique est bien connue présentent des états électriques opposés, telles que le cuivre et le zinc, l'or et le mercure, le soufre et les métaux, les substances acides et alcalines, etc. En supposant donc, dit Davy, une liberté parfaite dans le mouvement

des particules des corps en contact, ces particules doivent s'attirer l'une l'autre, en vertu de leurs pouvoirs électriques, et si ce pouvoir est assez grand pour leur donner une force attractive supérieure au pouvoir de l'agrégation, il se formera une combinaison qui sera plus ou moins forte, suivant que les énergies seront plus ou moins balancées; les signes d'électricité disparaîtront, et il se produira de la chaleur et de la lumière par la réunion des deux électricités.

Davy regardait encore comme nécessaire pour établir des relations entre les affinités et les forces électriques, de montrer que, lorsque deux corps vont se combiner, en élevant leur température, on exalte en même temps leur pouvoir électrique.

Telles sont les bases de la théorie électro-chimique de Davy, qui a régné dans la science pendant vingt ans et qui n'est plus adoptée. Celles de ces bases qui concernent les effets électriques produits au contact est inadmissible; ces effets provenaient dans ses expériences, non du contact, mais du frottement qu'éprouvaient les corps en les séparant, comme M. Becquerel (41[1]) l'a démontré; les acides secs, ainsi que les terres sèches, n'étant pas conducteurs de l'électricité, ne pouvaient donner d'électricité dans leur contact avec les métaux; il devait donc y avoir une action mécanique produite, comme, du reste, l'expérience l'a prouvé.

Suivant Davy, le mode d'action de l'électricité sur les corps paraît être de rétablir l'équilibre électrique naturel de leurs particules. Il considérait toutefois, et avec raison, l'action chimique des liquides sur l'un des éléments des couples métalliques dans la pile comme indispensable pour la circulation de l'électricité, de même que la décomposition du liquide traversé par la décharge quand le circuit est fermé. Il pensait que cette manière de voir conciliait le principe du contact avec les opinions émises par quelques physiciens sur l'origine chimique de l'électricité.

Les applications de l'électricité voltaïque à la chimie, à l'industrie et aux sciences naturelles, ont contribué à jeter un grand éclat sur les travaux de Davy. Il considéra la pile comme un moyen puissant de retirer des minéraux et des substances organiques les matières acides et alcalines qu'elles contiennent. Ainsi, un morceau de fibre musculaire, ayant été soumis pendant cinq jours à l'action d'une pile de cent cinquante couples, devint sec et dur, et ne laissa aucune trace de matière saline à l'incinération : la potasse, la soude et l'ammoniaque avaient été transportées au pôle négatif; les trois acides minéraux et l'acide phosphorique, au pôle positif. Il obtint des résultats semblables

en soumettant à l'action de la pile des feuilles de plantes et des corps vivants. Ainsi il observa que, lorsqu'on mettait les doigts bien lavés en contact avec de l'eau distillée dans la partie positive du circuit, il se manifestait rapidement une substance acide ayant les caractères d'un mélange d'acides sulfurique, chlorhydrique et phosphorique. Du côté négatif on trouvait une substance alcaline fixe. On trouve là l'explication du phénomène observé par Sulzer (voir page 23). Davy conçut déjà la pensée d'introduire dans les organes des animaux des substances acides, alcalines et même métalliques, dans le but de modifier quelques-unes de leurs parties constituantes.

Dans un autre mémoire (42) il indiqua comment on devait agir avec la pile comme moyen de décomposition, et fit usage de sa méthode pour rechercher les bases des terres et des alcalis. Dans les premiers essais qu'il fit sur la décomposition des alcalis en dissolution dans l'eau, il s'aperçut que la présence de l'eau était un obstacle à la production du phénomène. Il soumit ensuite à l'expérience de la potasse à l'état de fusion ignée : pendant toute la durée de l'expérience, il vit paraître autour du fil négatif une lumière très-intense, et au point de contact, une colonne lumineuse qui paraissait due au développement d'une matière combustible; le platine était fortement attaqué du côté positif. N'ayant pu recueillir la matière combustible, il employa l'électricité comme agent commun pour la fusion et la décomposition : il remplit ce double but en humectant légèrement la potasse, qui fut placée sur une lame de platine, mise en communication avec le pôle positif d'une batterie de deux cent cinquante couples, et fermant le circuit avec un fil de platine en relation avec le pôle négatif. Une action très-vive se manifesta, la potasse se fondit aux deux points électrisés. Du côté négatif il ne se dégagea aucun gaz, mais on y découvrit de petits globules qui avaient un éclat métallique très-brillant et brûlaient avec explosion et une flamme vive à l'instant de leur formation; ces petits globules étaient le potassium, base de la potasse : il obtint de la même manière le sodium avec la soude.

Il prouva ensuite que la vive déflagration qui avait lieu était due à la décomposition rapide de l'eau qui fournissait au nouveau métal de l'oxygène pour s'oxyder et former de la potasse.

Ayant cherché à obtenir les métaux de la baryte et de la strontiane, il vit également une lumière brillante et une inflammation au pôle négatif. En soumettant à l'expérience de l'acide borique humecté, il vit paraître à la surface négative une matière combus-

tible de couleur foncée qui lui parut être le résultat d'une décomposition.

Dans un autre mémoire (43), après quelques essais, il conçut l'idée d'enlever l'oxygène aux terres avec le potassium : n'ayant pu réussir, il employa le mercure pour former un amalgame avec les nouveaux métaux ; cette fois les résultats furent plus satisfaisants.

Tandis qu'il était occupé de ces recherches, il reçut, au commencement de juin 1808, une lettre de Berzélius qui lui annonçait que, conjointement avec le docteur Pontin, il était parvenu à décomposer la baryte et la chaux en les électrisant négativement en contact avec le mercure ; il répéta aussitôt l'expérience avec sa grande batterie, et obtint l'amalgame de barium, qui, projeté dans l'eau, la décomposa ; et le mercure devint libre. La chaux et la strontiane donnèrent des résultats analogues. Quant à la magnésie, il fallut continuer l'opération pendant longtemps pour produire l'amalgame : l'action de ce dernier sur l'eau était très-lente ; l'opération fut plus facile en employant le sulfate de magnésie mouillé, au lieu de la magnésie.

Il obtint des quantités assez notables de ces nouveaux métaux en soumettant à la distillation leur amalgame, hors du contact de l'air ; les nouveaux métaux furent appelés potassium, sodium, barium, strontium, calcium et magnésium.

L'alumine, la silice, la zircone et la glucine, soumises au même mode d'action, ne donnèrent aucun indice de décomposition ; il fut obligé, pour opérer leur réduction, d'avoir recours à un autre procédé, fondé sur l'affinité du potassium pour les métaux des terres : il mit dans un creuset de platine un mélange d'une partie de silice et de six parties de potasse qu'il maintint en ignition, et établit ensuite la communication avec sa grande pile. Le creuset fut mis en rapport avec le pôle positif, et la masse alcaline fondue avec le pôle négatif, au moyen d'une tige de platine : il se fit aussitôt une effervescence, et des globules brillants s'élevèrent à la surface ; il se forma autour de la tige des écailles métalliques brillantes, qui blanchirent au contact de l'air et firent effervescence dans l'eau. L'addition de quelques gouttes d'acide chlorhydrique en dégagea aussitôt de la silice ; l'alumine se comporta de même, ainsi que la zircone. Ce procédé a été mis depuis en pratique, mais avec plus d'avantage.

Une autre question attira vivement son attention, ce fut celle de la formation, de la nature et des propriétés de l'amalgame produit

par l'ammoniaque au pôle négatif. Ce nouveau composé provoqua une vive polémique entre Davy, Berzélius, d'une part, Gay-Lussac et Thénard de l'autre. Les premières expériences pour obtenir cet amalgame sont dues au docteur Seebeçk (44), qui le découvrit dans les premiers mois de 1808, en faisant réagir, au moyen de la pile, le mercure sur le carbonate d'ammoniaque : dans cette expérience, le mercure augmente graduellement de volume, et, quand il est devenu quatre ou cinq fois plus étendu que dans son état primitif, il devient solide et d'une consistance molle ; il publia le fait sans en donner de théorie. Berzélius et Pontin annoncèrent à Davy qu'ils étaient parvenus à combiner le mercure avec la base de l'ammoniaque, qu'ils appelèrent *ammonium;* l'ammoniaque, suivant eux, était un oxyde à base ternaire (45). Davy adopta la théorie de Berzélius (46) relativement à l'existence de l'ammonium ; mais il n'en fut pas de même de Gay-Lussac et de Thenard (47), qui démontrèrent que l'amalgame ammoniacal était formé de mercure, d'ammoniaque et d'hydrogène, puisqu'en agitant cet amalgame parfaitement sec, dans un tube long et étroit rempli d'air, la combinaison était détruite sans que l'air fût aucunement modifié. Depuis, cette opinion a été adoptée.

Les expériences de Davy sur les décompositions chimiques firent supposer à Wollaston (48) qu'il existait peut-être un mode d'action analogue dans le système des sécrétions animales, et qu'une décharge électrique, moins intense que celle que l'on observe dans la torpille, pourrait servir à l'explication de plusieurs phénomènes, tels, par exemple, que la rapidité des communications de l'influence nerveuse dans les diverses parties des corps vivants. Wollaston fit, à cette occasion, une expérience très-simple pour démontrer qu'on pouvait décomposer une solution de sel marin avec un seul couple voltaïque; aussi en tira-t-il cette conséquence, entrevue déjà par Napoléon, que la surabondance acide que l'on observe en général dans l'urine paraît indiquer dans les reins un état électrique positif, et dans les vaisseaux du foie un état négatif.

Aussitôt après les découvertes de Davy, Gay-Lussac et Thenard (49) se livrèrent à une suite de recherches physico-chimiques, à l'occasion d'une grande pile donnée à l'École polytechnique par Napoléon; ils s'appliquèrent particulièrement à déterminer l'influence que pouvaient exercer sur l'action chimique le nombre des couples et la nature du liquide; ils furent ainsi conduits à plusieurs conséquences importantes, en prenant pour mesure de l'énergie

chimique la quantité de gaz fournie dans un temps donné par la décomposition de l'eau : ce fut le premier emploi du voltamètre; mais ces questions ne pouvaient être résolues complétement à cette époque, attendu que l'on ne connaissait pas les moyens exacts de trouver le pouvoir conducteur des solides et des liquides.

Les travaux de Davy avaient eu un tel retentissement que l'Académie des sciences de l'Institut de France lui décerna, en 1808, le prix annuel du galvanisme dont il a été fait mention précédemment.

§ VI. *Phénomènes physiques produits avec de fortes piles; effets lumineux et calorifiques.*

M. Biot (50) avait annoncé que la production de la lumière était due au passage rapide de l'électricité au travers de l'air, qui, étant fortement comprimé, s'échauffait, et dégageait alors assez de chaleur pour qu'il y eût émission de lumière. Davy examina jusqu'à quel point cette opinion était fondée; on savait déjà que les couleurs de la lumière varient suivant la force de l'étincelle et la pression du gaz qu'elle traverse, et qu'elles dépendent aussi de la nature du corps dont on tire des étincelles (51).

Davy (52) disposa un appareil dans lequel il avait fait le vide sur le mercure, sur d'autres métaux en fusion et sur diverses dissolutions; en opérant la décharge d'une bouteille ou d'une batterie, il obtint les résultats suivants : le vide mercuriel parfait est perméable à l'électricité, et il devient lumineux, soit par l'étincelle ordinaire, soit par la décharge d'une bouteille de Leyde. Quand le tube est très-chaud, la lumière électrique se montre dans la vapeur mercurielle avec une couleur verte vive et de grande intensité; à un froid de 20° au-dessous de zéro du thermomètre de Fahrenheit, la lumière est excessivement faible; pendant l'ébullition du mercure, la lumière a le plus grand éclat.

Les conséquences suivantes résultent de toutes ses expériences : la lumière électrique dépend principalement de quelques propriétés qui appartiennent à la matière pondérable à travers laquelle passe l'électricité ou qu'elle entraîne avec elle; l'espace où il n'y a pas de quantité appréciable de cette matière est capable d'offrir les phénomènes lumineux, mais cela résulte probablement de ce que les particules superficielles des corps, entraînées par les décharges électriques, deviennent incandescentes, et produisent alors les apparences lumineuses observées.

Cette dernière opinion, qui a été une des bases de sa théorie électro-chimique, a été partagée par Berzélius, qui pensait que la chaleur était produite dans les combinaisons chimiques de la même manière que dans la décharge électrique.

Les effets calorifiques dont nous venons de parler n'étaient rien, comparés à ceux que Davy obtint en 1813, avec la pile de l'Institution royale de Londres, composée de deux mille couples présentant une surface de 128,000 pouces carrés. Ayant fait passer entre deux pointes de charbon placées à peu de distance l'une de l'autre la décharge de cette énorme pile, il se produisit une lumière dont on ne pouvait comparer l'éclat qu'à celui du soleil; toutes les substances infusibles ou jugées telles, placées entre les deux pointes de charbon, ne purent résister à une chaleur aussi forte et entrèrent en fusion. Tous ces effets ayant eu lieu dans le vide, Davy ne put admettre pour cause de la chaleur et de la lumière la combustion du charbon; il en tira la conséquence que l'une et l'autre devaient être attribuées à la réunion des deux électricités. Les particules de charbon enlevées par l'action de l'électricité, et transportées de la pointe de charbon positive à la pointe négative, constituaient le conducteur servant à la circulation du courant. L'arc voltaïque obtenu dans ces conditions est utilisé maintenant, dans certains cas spéciaux, comme puissante source de lumière.

A la même époque, Children faisait construire une pile d'une grandeur remarquable, dans laquelle chacun des éléments avait une surface de 32 pieds carrés anglais; des fils de platine qui avaient jusqu'à 2 lignes de diamètre et d'une certaine longueur, furent rougis, et même fondus; les métaux et les oxydes infusibles à la chaleur de nos fourneaux, entrèrent en fusion. Ces expériences furent faites de 1813 à 1815.

Wollaston fondit un fil très-fin de platine avec un seul couple voltaïque de la plus petite dimension: cette expérience et d'autres observations antérieures lui démontrèrent que, pour avoir les plus grands effets de chaleur, il fallait augmenter dans chaque couple voltaïque la surface du cuivre relativement à celle du zinc, celle-ci devant être deux fois moindre; c'est d'après ce principe qu'a été construite la pile dite à la Wollaston.

Effets physiques différents produits par chacune des deux électricités. Trémery (53) a reconnu qu'en faisant passer la décharge d'une bouteille de Leyde entre deux pointes placées l'une d'un côté d'une carte, l'autre sur la face opposée, la carte était per-

cée vis-à-vis de la pointe négative; l'électricité positive avait donc éprouvé moins de résistance à traverser l'air que l'électricité négative; ce qui le prouvait, c'est qu'en opérant dans le vide, la earte était percée au milieu de l'intervalle entre les deux pointes.

Porret (54), en opérant avec l'électricité voltaïque, a découvert que les deux électricités ne jouissent pas au même degré de la faculté de transporter mécaniquement les molécules du eorps; ayant partagé l'intérieur d'un vase de verre en deux parties avec une vessie, et qu'il a remplies d'eau, il a fait passer au travers du liquide, au moyen de deux lames de platine, le courant d'une pile de 80 éléments, il a vu l'eau s'élever dans la ease négative et s'abaisser dans l'autre; il y avait donc eu transport mécanique de l'eau par le courant allant du pôle positif au pôle négatif, comme dans l'expérience de l'arc voltaïque de Davy.

Nous mentionnerons enfin les expériences d'Erman (55) sur une réciprocité d'action isolante et conductrice que divers corps, et particulièrement le platine incandescent de la lampe aphlogistique de Davy, exercent sur les deux électricités. Erman, dans cette dernière expérience, a considéré comme simple un phénomène composé, puisqu'il a négligé l'électricité dégagée dans la combustion et les effets thermo-électriques; nous reviendrons sur ce fait.

§ VII. *Théorie mathématique des phénomènes d'électricité statique.*

Lorsqu'une partie de la physique a réuni un grand nombre de faits bien décrits et mesurés, et qu'elle possède les principales lois qui les régissent, le mathématicien intervient pour les réunir tous dans une théorie générale. Au commencement du siècle, l'électricité était arrivée à ce point qu'il ne fallait plus qu'un homme éminent pour résoudre ce problème, à l'égard des phénomènes d'électricité statique. Poisson (56), en considérant chacun des deux principes électriques comme un fluide incompressible dont les particules, douées d'une parfaite mobilité, se repoussent mutuellement et attirent celles de l'autre principe, en raison inverse du carré de la distance, et admettant, en outre, qu'à égale distance le pouvoir attractif est égal au pouvoir répulsif, a cherché la conséquence mathématique que l'on pouvait en tirer. Les résultats qu'il en a déduits se sont trouvés parfai-

tement d'accord avec ceux que Coulomb avait obtenus par l'expérience.

Le géomètre français a d'abord trouvé, comme l'expérience l'avait appris à Beccaria et à Coulomb, que tout le fluide électrique introduit dans un corps se porte entièrement à sa surface, où il forme une couche excessivement mince; il détermina ensuite la surface intérieure de cette couche, ainsi que son épaisseur; quant à la surface extérieure, elle se trouva être la même que celle du corps, puisque l'électricité n'était retenue que par la pression de l'air: aussi Poisson considéra-t-il l'air comme un vase imperméable de forme donnée, qui contient le fluide dans sa capacité intérieure, et résiste par la pression à la tendance qu'il a de s'échapper. La surface intérieure de cette couche se trouvant peu différente de l'autre, puisqu'elle est très-mince, pour en déterminer la forme et l'épaisseur, qui n'est pas la même sur toutes les parties de la surface, Poisson établit dans ses calculs la condition que le corps ne peut demeurer dans un état électrique permanent, qu'autant que la forme de la surface est telle que la couche entière n'exerce ni attraction ni répulsion sur les points qui se trouvent dans son intérieur. Quand le corps est une sphère, les deux surfaces de la couche électrique sont également sphériques. Il en est de même avec un ellipsoïde: la surface est également un ellipsoïde concentrique et semblable; son épaisseur est la plus grande au sommet du grand axe, et la moindre au sommet du plus petit; les épaisseurs aux deux sommets sont en raison des longueurs des axes. A l'extrémité d'un cône, la pression deviendrait infinie si l'électricité pouvait s'y accumuler; mais, comme la pression ne saurait faire équilibre à la résistance de l'air qui est d'une valeur finie, l'électricité s'écoule : tel est le pouvoir des pointes. Poisson a démontré effectivement que, sur un ellipsoïde allongé de révolution, la pression est d'autant plus considérable aux deux pôles que l'axe qui les joint est plus grand par rapport au diamètre de l'équateur; l'une et l'autre pression sont dans le rapport du carré de l'axe du pôle au carré du diamètre de l'équateur.

Poisson s'est occupé ensuite d'un cas plus composé, celui où plusieurs corps électrisés et conducteurs sont placés à des distances telles qu'ils peuvent exercer des actions par influence les uns sur les autres; il a déduit de ses formules des résultats absolument semblables à ceux que Coulomb avait trouvés par l'expérience dans les mêmes circonstances.

Il est à présumer qu'en apportant quelques modifications aux formules de Poisson, pour les adapter à l'hypothèse d'un seul fluide, on pourrait en déduire toutes les conséquences qu'il en avait tirées.

Nous aurions encore, pour terminer l'histoire de cette période, à parler du pouvoir conducteur des métaux pour l'électricité, et des diverses théories électro-chimiques; mais nous remettons à traiter ces questions dans les chapitres suivants, afin de les compléter par l'exposé des travaux modernes. Dans la période que nous quittons, trois hommes se sont montrés hors ligne, Galvani, Volta et Davy, mais Volta au premier rang; leurs travaux auront sur les sciences physico-chimiques une influence qui ne saurait se ralentir.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE II.

(1) *De Bononiensi scientiarum et artium instituto atque academia commentarii, t. VII de veribus electricitatis in motu musculari commentarius.*

(2) *Journal de Leipsig*, t. XXXIV, art. 14, p. 284.

(3) *Giornale physico medicale*, t. XIV, 1797.

(4) *Bibl. britann.*, t. XVII, p. 237.

(5) *Uber Thiereschc und reis barkeit*, p. 233.

(6) *Recueil périodique de littérature médicale et étrangère.*

(7) *Médecine éclairée par les sciences physiques*, t. IV, p. 66; et *Histoire du galvanisme*, par Sue, t. I, p. 54.

(8) *Recueil de la Société libre de médecine*, t. IV, p. 284. — *Journal de physique*, brumaire et frimaire an VII.

(9) *Expériences sur le galvanisme et en général sur l'irritation des fibres musculaires et nerveuses;* traduit en 1799, en français, par Jadelot.

(10) *Histoire du galvanisme*, par Sue, t. II, p. 78.

(11) *Bibl. britann.*, n° 116, p. 3. — *Journal de Nicholson*, juillet 1800. — *Journal de physique*, an IX.

(12) *Bibl. britann.*, t. XV, p. 11.

(13) *Nicholson Journal*, juillet 1800, p. 183.

(14) *Journal de physique*, pluviôse an IX, p. 101.

(15) *Mémoires de l'Institut national*, t. V, p. 197.

(16) *Id.*, *ibid.*, p. 233.

(17) *Von Crell's chemische Annalen*, 1801, 4e cah., p. 337.

(18) *Journal de physique*, vol. II, p. 190.

(19) *Bulletin de la Société philomathique*, flor., an X, n° 62.

(20) *Journal de chimie de Van Mons*, n° 11, p. 215.

(21) *Bibl. britann.*, nos 173 et 174, p. 207. — *Journal de Van Mons*, n° 1 ?, , , p. 285.

(22) *Philos. Magaz.*, juin 1801.

(23) *Philos. Magaz.*, juin 1801.
(24) *Bulletin de la Société philom.*, n° 53, therm. an IX. — *Annales de chimie*, t. XXXIX, p. 242.
(25) *Bulletin de la Société philom.*, messidor an X, p. 120.
(26) *Mémoires des sociétés savantes et littéraires de la république française*, t. I, p. 471.
(27) *Das electrische system der Koeper.*
(28) *Journal de chimie et de physique de Gahlen*, vol II.
(29) *Journal de chimie de Van Mons*, n° 4, p. 68.
(30) *Notice historique sur les piles sèches.* — *Annales de chimie et de physyque*, t. V, p. 191.
(31) *Annales de Chimie et de physique*, t. XI, p. 190.
(32) *Idem*, t. XLIV, p. 206.
(33) *Journal de Van Mons*, n° 10, p. 115.
(34) *Annales de chimie*, t. XLV.
(35) *Memoires de l'ancienne école de médecine*, t. II, III, IV et V.
(36) *Grapen Giesser, der Arzneikunde und Wundarzneikunst doctor*, 1801.
(37) *Journal des Débats*, 6 thermidor an XI.
(38) *Philos. Trans.*, 1807. — *Annales de chimie*, t. LXIII, p. 172.
(39) *Annales de chimie*, t. XXXVII, p. 233.
(40) *Moniteur*, n° 40, 1806.
(41) *Philos. Trans.*, vol. XCI, p. 397.
(42) *Annales de chimie*, t. LXVIII.
(43) *Idem*, t. LXX, p. 189.
(44) *Idem*, mai 1808.
(45) *Bibl. britann.*, juin 1809, p. 122.
(46) *Annales de chimie*, t. LXXVI, p. 257.
(47) *Idem*, t. LXXIII, p. 197.
(48) *Philos. Mag.*, juin 1809.
(49) *Recherches électro-chimiques*, en 2 volumes.
(50) *Annales de chimie*, t. LIII, p. 351. — *Philos. Trans.*, vol. LXXV, p. 188.
(51) *Morgan's lecture*, p. 236.
(52) *Annales de chimie et de physique*, t. XX, p. 168.
(53) *Traité de physique* (Haüy).
(54) *Annals of philosophy*, juillet 1816. — *Annales de chimie et de physique*, t. II, 1re série.
(55) *Mémoires de l'Académie de Berlin* pour 1818 et 1819.
(56) *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XII, p. 1 et 163.

CHAPITRE III.

Du magnétisme, depuis les temps anciens jusqu'en 1820.

---

§ I. *Premières notions du magnétisme.*

Les anciens connaissaient la propriété dont jouissent certaines mines de fer d'attirer les parcelles de ce métal placées à peu de distance.

Quelques auteurs grecs (1) ont appelé l'aimant *héraclée*, du nom de la ville près de laquelle on le trouva; d'autres ont fait dériver le nom de *magnète* qu'on lui a donné, et celui de *magnétisme*, de *Magnesia*, contrée de la Lydie, où il fut également découvert.

Pline (2) affirme que ces pierres, appelées *aimants*, reçurent ce nom de leur inventeur, le berger Magnès, qui en fit la découverte sur le mont Ida, selon Nicander, en faisant paître ses troupeaux: des parcelles de ces pierres s'étaient attachées aux clous de fer de ses chaussures et à la pointe de même métal de son bâton.

Pline rapporte encore que Dinocarès proposa à Ptolémée Philadelphe de bâtir à Alexandrie un temple dont la voûte, garnie de pierres d'aimant, soutiendrait en l'air une statue de fer de la reine Arsinoé. Saint Augustin fait aussi mention d'une statue suspendue en l'air, au milieu du temple de Sérapis, à Alexandrie.

Les propriétés de ces pierres parurent miraculeuses comme celles de l'ambre quand il est frotté; aussi les anciens leur supposèrent-ils également une âme et plusieurs vertus médicinales. Hippocrate lui-même rangea cette substance au nombre des purgatifs.

Si les anciens ont connu le pouvoir attractif de l'aimant, ils ont ignoré sa polarité et sa propriété directrice; car, si elles eussent été connues, nul doute que des auteurs n'en eussent parlé (3), et notamment Claudien dans ses beaux vers sur les aimants :

..... *Lapis est cognomine magnes,*
Decolor, obscurus, vilis, non ille repexam
Cesariem regum, etc.

D'un autre côté, on a voulu traduire le mot *vorsoria* (4), qui se trouve dans deux passages de Plaute, par aiguille aimantée; mais il paraît plus probable que ce mot est un dérivé de *vertere*, et qu'il désignait une corde au moyen de laquelle on tournait les voiles.

Il faut aller jusqu'à Marcellus Empiricus (5), médecin de Théodose, pour avoir quelques notions sur la polarité de l'aimant; il dit que l'aimant, appelé *antiphyson*, « attire et repousse le fer. »

Les Chinois ont connu, dit-on, dès la plus haute antiquité, l'aimant, sa force attractive et sa polarité. Quant à l'emploi de l'aiguille aimantée pour se diriger sur mer, Klaproth dit que la description la plus ancienne d'une boussole qu'il ait pu trouver dans leurs livres ne date que d'une époque comprise entre 1111 et 1117 de Jésus-Christ. Mais il est probable, ajoute-t-il sans en avoir la preuve, que les Chinois en faisaient usage dans les troisième et quatrième siècles.

Duhalde (6) assure cependant que l'on se servait de la boussole en Chine pour voyager sur terre, plus de mille ans avant Jésus-Christ.

Le premier ouvrage français qui parle de la boussole est un poëme manuscrit du douzième siècle, en langage ancien, qui existe à la Bibliothèque impériale, et qui est attribué à un certain Guyot de Provins. Il y est fait mention de la boussole, connue alors sous le nom de *marinière* ou de *manière* (7).

« De nostre pere l'apostoile [le pape]
« Vousisse qu'il semblast l'estoile
« Qui ne se meut; mout bien la voient,
« Li marinier qui si navoient [ainsi navignent].
« Par cele estoile vont et vienent
« Et lor sens et lor voie tienent;
« Il l'appellent la *tresmontaigne*,
« Celle est atachi et certaine :
« Toutes les autres se removent,
« Et lor leus eschangent et muevent,
« Mais cele estoile ne se meut.
« Un art font qui mentir ne peut,
« Par la vertu de la *maniere* (*).
« Une pierre laide et bruniére,
« Où li fers volontiers se joint,
« Ont; si esgardent le droit point,
« Puis qu'une aguille l'ait touchie
« Et en un festu l'ont fichie
« En l'esve la mettent sans plus,
« Et li festu la tient dessus;
« Puis se torne la pointe toute
« Contre l'estoile, si sans doute
« Que jà por rien ne faussera
« Et mariniers nul doutera.
« Quant la mers est obscure et brune
« Qu'on ne voit estoile né lune,
« Dont font à l'aiguille alumer;
« Puis, n'ont-ils garde d'esgarer.
« Contre l'estoile va la pointe,
« Por ce, sont li marinier cointe
« De la droite voie tenir,
« C'est un ars qui ne peut faillir.
« Mout est l'estoile bele et clère,
« Tex devroit estre notre père. »

(*) *Amanière* ou *manière*, *manète*, la pierre d'aimant.

Le cardinal Jacques de Vitry (8), qui vivait vers l'an 1200, parle de l'aiguille aimantée, et dit qu'elle était nécessaire et indispensable aux voyageurs sur mer.

Le jésuite Riccioli prétend que, sous le règne de saint Louis, les navigateurs français se servaient ordinairement de l'aiguille aimantée, qu'ils tenaient nageant dans un petit vase d'eau, et qui était soutenue pour ne pas aller au fond.

Toutes ces citations démontrent que l'usage de l'aiguille aimantée était généralement connu en Europe vers la fin du douzième siècle; mais aucun auteur, à la vérité, ne dit que ce soit dans cette contrée qu'elle ait été inventée. On a dit, et Gilbert l'a avancé également, que cette invention avait été rapportée de la Chine par Marco Paolo, célèbre voyageur qui était revenu de ces contrées en Europe vers 1295; mais il n'en est nullement question dans la relation que ce dernier a donnée de son voyage. Klaproth est porté à croire que ce fut pendant les croisades que les Européens eurent connaissance de l'aiguille aimantée et du parti que l'on pouvait en tirer pour la navigation; quelques savants en ont attribué l'invention aux Arabes, mais sans preuves bien positives.

Déclinaison et inclinaison. Suivant Klaproth (9), les Chinois ont connu longtemps avant nous la déclinaison de l'aiguille aimantée.

Thévenot assure, dans ses voyages, avoir vu une lettre de Pierre Adgige, écrite en 1269, plus de deux cents ans par conséquent avant Colomb, dans laquelle on disait positivement que l'aiguille déclinait de 5°.

Colomb, qui était à la recherche du nouveau monde, en 1492, observa aussi que la direction de l'aiguille aimantée n'était pas constante.

En 1497, Vasco de Gama, navigateur portugais, fit usage de la boussole dans sa première expédition dans l'Inde.

Le manuscrit d'un pilote de Dieppe, nommé Grignon, dédié, en 1534, à Sébastien Chabot, fait également mention de la déclinaison de l'aiguille aimantée. Néanmoins on fait honneur aussi de cette découverte à Chabot lui-même, à Gonzalès et à d'autres (10). Quoi qu'il en soit, la propriété dont jouit l'aiguille aimantée de s'écarter plus ou moins dans chaque lieu, à droite ou à gauche de son méridien, c'est-à-dire de présenter une déclinaison plus ou moins grande, était très-connue dans le seizième siècle.

Les plus anciennes observations un peu exactes sur la déclinaison commencèrent à Paris en 1550. A cette époque, la déclinaison était

vers l'est; elle est devenue nulle en 1663, puis elle est repassée à l'ouest en augmentant successivement, et, depuis quelques années, sa marche est décroissante.

Les navigateurs hollandais, en 1599, dressèrent aussi des tables de déclinaison qui sont assez exactes.

En 1576, Robert Normann, ingénieur en instruments de physique à Londres, découvrit que l'aiguille aimantée éprouvait encore une autre espèce de variation. On avait eu occasion de remarquer que l'aiguille aimantée perdait son horizontalité en approchant vers le nord, et que son pôle austral s'abaissait au-dessous de l'horizon; comme on ne savait à quelle cause attribuer cet effet, on supposa que l'aiguille n'était pas suspendue par son centre de gravité. Robert Norman, ayant placé un contre-poids pour rétablir l'horizontalité, s'aperçut qu'il fallait le changer d'un lieu à un autre. Il fut conduit par là à la découverte de l'inclinaison. On ne tarda pas à reconnaître que, pour observer complétement ce phénomène, il fallait que l'aiguille fût libre de se mouvoir dans le plan du méridien magnétique. Cette condition fut remplie en suspendant l'aiguille par son milieu à un axe perpendiculaire à ce plan: quand l'aiguille n'était pas aimantée, elle restait dans une direction horizontale; aussitôt qu'elle devenait magnétique, elle se déviait de cette direction d'un certain nombre de degrés. L'angle de déviation fut appelé *inclinaison*.

Propriétés des aimants. Quittons les premières découvertes sur la direction des aimants, et abordons les travaux des physiciens postérieurs au seizième siècle. Parmi les premiers auteurs qui aient écrit des ouvrages spéciaux et didactiques sur le magnétisme, au commencement du dix-septième siècle, on peut citer Gilbert (11) et Nicolas Cabeo Ferrariensi. Le premier, après avoir cité, livre Ier, chap. Ier, les auteurs qui avaient traité de l'aimant, chercha à prouver que la terre était un grand aimant; il dit (livre Ier, chap. XVII) que l'aimant, tel que nous le connaissons, est l'élément essentiel de la terre; il admet que les parties ont les mêmes propriétés que le tout, et par conséquent que les différentes parties de la terre doivent être magnétiques. Il cherche à expliquer la direction de l'aiguille aimantée ainsi que ses variations; il avance ensuite, comme l'avait fait Peregrini (auteur plus ancien que lui, cité par Cabeo et dont les ouvrages manquent), qu'un aimant ne diffère pas d'un fer aimanté, si ce n'est que l'un est plus parfait que l'autre; que le fer aimanté perd sa propriété magnétique par la chaleur.

Gilbert avait une idée du fluide neutre, quand il avance que dans le fer la propriété magnétique existe, puisqu'elle se manifeste et devient énergique en présence et à une certaine distance de l'aimant.

Nicolas Cabeo (12) reconnaît que Gilbert est le premier qui, en s'appuyant sur l'expérience, ait traité la question des aimants avec beaucoup plus de soin qu'on ne l'avait fait auparavant. Il parle de la déclinaison et de l'inclinaison, qu'il cherche à expliquer en faisant intervenir des causes occultes dont la science était encore infestée au dix-septième siècle, tout en combattant celles qui avaient été mises en avant par ses devanciers.

En traitant de la déclinaison, il avance qu'elle est plus forte dans un pays, moindre dans un autre ; qu'elle est tantôt occidentale, tantôt orientale ; qu'en Europe elle est orientale. Relativement à l'inclinaison, il dit aussi, comme on le savait, que, lorsque l'aiguille a été équilibrée préalablement, elle s'incline aussitôt qu'elle est aimantée.

Nicolas Cabeo (12[1]) décrit une expérience pour montrer que la puissance magnétique se transmet à travers tous les corps; il montre, dans une autre, qu'une tige de fer soutenue verticalement devient magnétique sous l'influence de la terre, fait déjà observé par Gilbert, mais que ce dernier attribuait à une autre cause (12[2]). Il rapporte qu'en brisant un aimant en deux, chaque moitié possède la polarité (12[3]), fait indiquant que le magnétisme ne se transmet pas dans les corps d'une molécule à un autre, comme l'électricité.

On trouve encore dans l'ouvrage de Cabeo un certain nombre d'expériences relatives à différents points du magnétisme et de la direction des aimants; c'est ainsi qu'il montre que toutes pointes ou barres de fer qui n'ont jamais été aimantées acquièrent la polarité avec le temps; qu'un fer chauffé et refroidi dans le méridien magnétique devient également magnétique avec deux pôles; que, si le pôle d'un aimant est mis en contact avec le milieu d'une tige de fer, les deux extrémités acquièrent le même magnétisme; il se produit en effet au milieu un point conséquent. Il montre encore que le fer rouge n'agit plus sur une aiguille aimantée; il étudie également les directions que prennent deux ou plusieurs aimants en présence l'un de l'autre.

On voit donc que, dès le commencement du dix-septième siècle, on connaissait déjà les propriétés générales des aimants; mais ce n'est qu'à la fin du siècle dernier que les méthodes employées par Coulomb permirent de soumettre au calcul les résultats des observations, et d'atteindre la rigueur qu'exigent les recherches en physique.

§ II. *Procédés d'aimantation.*

La plupart des travaux sur le magnétisme qui furent exécutés jusqu'aux découvertes de Coulomb, c'est-à-dire jusque vers 1780, ont eu principalement pour but de modifier et de perfectionner les différents procédés d'aimantation, afin de donner une plus grande force et une plus grande persistance aux aimants. Lorsqu'on eut reconnu qu'un aimant ou un morceau de fer abandonné pendant longtemps aux influences atmosphériques était capable de transmettre le magnétisme à des barreaux d'acier par le frottement d'un de ses pôles, on dut rechercher les moyens les plus efficaces pour donner à ces barreaux le maximum d'effet, appelé l'état de saturation.

Jusqu'au milieu du siècle dernier on se bornait à passer l'un des pôles d'un aimant sur toute la longueur des barreaux, au lieu d'approcher celui-ci du premier par simple contact. Cette méthode, qui est celle du contact successif, ne présente aucun inconvénient quand le barreau est court et que l'aimant est puissant; mais il n'en est plus de même lorsqu'il est très-long et fortement trempé : il peut arriver, dans ce cas, que l'aimantation ne s'étende pas régulièrement jusqu'à l'extrémité opposée; il en résulte alors des points conséquents dont on doit se garantir dans la construction des aiguilles aimantées.

Différentes méthodes furent successivement imaginées pour donner une grande puissance aux barreaux (13), par Knight, médecin de Londres; Mitchell, Canton, de la Société royale de Londres; Duhamel, Antheaume et Coulomb.

Knight, en 1745, fit connaître un perfectionnement dans le mode d'aimantation par simple contact. Ayant placé bout à bout, par les pôles de nom contraire, deux barreaux fortement aimantés, il posait dessus, dans le sens de leur longueur, un petit barreau d'acier trempé cerise clair, de manière que son milieu correspondait aux points de jonction des deux barreaux; puis il séparait ceux-ci en les faisant glisser dans un sens opposé jusqu'aux extrémités du petit barreau, qui se trouvait avoir acquis un magnétisme plus fort que celui qu'on lui aurait communiqué par les moyens alors en usage. Cette méthode sert encore à aimanter à saturation seulement des barreaux courts et peu épais.

Peu de temps après cette découverte, Duhamel et Antheaume indiquèrent une autre méthode, qui est excellente pour aiman-

ter les aiguilles de boussoles et les lames minces : ayant placé parallèlement l'un à l'autre deux barreaux joints à leurs deux extrémités par deux parallélipipèdes de fer doux, ils prirent deux barreaux aimantés qu'ils inclinèrent de 25 à 30° sur la direction des barreaux à aimanter, et les posèrent d'abord au milieu de l'un d'eux, les pôles inverses en regard; puis ils les firent glisser un certain nombre de fois en sens contraire, jusqu'à l'extrémité de l'un d'eux; ils firent la même opération sur l'autre barreau. Œpinus, en substituant deux aimants aux parallélipipèdes de fer doux, accrut le développement du magnétisme.

Mitchell et Canton, en Angleterre, s'occupèrent de l'aimantation à la même époque que Duhamel. Le premier imagina la double touche, qui consiste à prendre deux barreaux fortement aimantés, liés parallèlement entre eux, à les tenir dans une position verticale, les pôles inverses en regard et à une distance de 7 à 8 millimètres l'un de l'autre; après avoir placé en contact plusieurs barreaux égaux, à la suite les uns des autres, sur une même ligne droite, on fait glisser le double barreau, à angles droits, par une de ses extrémités, tout le long de cette ligne; en l'appliquant au centre de celui que l'on veut aimanter, et faisant sur chacune des deux moitiés un nombre égal de frictions, les barreaux intermédiaires acquièrent alors une grande force magnétique, mais non un maximum.

Les barreaux intermédiaires devaient acquérir le plus fort magnétisme, par cela même qu'ils étaient soumis à l'action par influence des barreaux extrêmes. Sous ce rapport, les barreaux de fer doux présentent plus d'avantage que les barreaux d'acier; le procédé de Mitchell l'emporte sur celui de Duhamel.

Œpinus a fait une modification heureuse au procédé de la double touche : au lieu de maintenir les deux barreaux glissant toujours parallèlement l'un à l'autre, il les a inclinés en sens contraire, comme Duhamel l'avait fait, afin que les résultantes longitudinales fussent plus considérables, les actions agissant plus obliquement sur la surface du barreau (14).

Cette innovation affaiblissait, à la vérité, l'action propre de chaque barreau glissant, qui n'a plus qu'une ligne de contact avec le barreau; mais l'expérience a prouvé que jusqu'à une certaine limite, 15 à 20°, les barreaux inclinés présentent de l'avantage.

Cette méthode, qui a l'inconvénient de faire naître plus facilement des points conséquents dans des barreaux d'une certaine longueur

que la méthode de Duhamel, n'est employée ordinairement que pour donner à de gros barreaux un fort degré de magnétisme, sans qu'il soit nécessaire d'avoir une égale distribution.

Coulomb (15), mettant à profit les avantages que présentent les méthodes que nous venons d'exposer, adopta les dispositions suivantes, qui jusqu'ici n'ont éprouvé aucun changement : les barreaux fixes dont il a fait usage étaient des faisceaux composés de dix barreaux d'acier trempé cerise clair, de 5 à 6 décimètres de longueur, 15 millimètres de largeur et 5 d'épaisseur. Après les avoir aimantés autant que possible, il les réunissait par leurs pôles de même nom, en formant deux couches de cinq barreaux chacune, séparées par de petits parallélipipèdes rectangles de fer très-doux, faisant un peu saillie au delà de leurs extrémités.

M. Biot (16) a trouvé qu'il valait mieux substituer à ces parallélipipèdes des lames de fer doux se réunissant à l'extrémité des aimants, de manière à former une pyramide tronquée. Les barreaux glissants sont formés comme les barreaux fixes ; mais, au lieu de dix barreaux partiels, il en prend quatre, ayant chacun 400 millimètres de longueur, 5 d'épaisseur et 15 de largeur. On les réunit ensuite, deux sur la largeur et deux sur l'épaisseur, en les séparant, comme ci-dessus, par des bandes de fer doux.

Cette méthode est fondée sur la distribution du magnétisme dans les aimants, qui est telle que, le plus grand développement de magnétisme ayant lieu vers les extrémités, chaque étage tend à maintenir dans l'étage inférieur la séparation du magnétisme.

L'action seule de la terre suffit pour aimanter des barres de fer et leur faire conserver la faculté magnétique; il faut pour cela les placer dans le méridien magnétique, suivant la direction de l'aiguille d'inclinaison, et les frapper à coups de marteau pour les écrouir; du reste, d'après ce que l'on a vu, on connaissait déjà ce fait du temps de Gilbert. Actuellement on a des moyens plus directs de donner aux barreaux d'acier le maximum d'aimantation qu'ils peuvent recevoir : il suffit, ainsi qu'on le verra dans le chapitre suivant, d'avoir recours aux effets d'induction électro-magnétique; mais, avec ce moyen comme avec les autres, la nature de l'acier, sa température, son état physique et sa trempe, influent seuls sur l'intensité de la puissance magnétique qu'ils peuvent acquérir et sur la durée de la conservation de celle-ci.

On a reconnu encore que l'on obtenait de grands avantages lorsqu'on aimante un barreau en le maintenant pendant cette opé-

ration à la température rouge, et en lui faisant éprouver ensuite un refroidissement brusque pendant qu'il se trouve sous l'influence des forces magnétiques.

Armures ou armatures. Les armures ou armatures ont été imaginées vers le milieu du siècle dernier pour augmenter la force des aimants naturels et artificiels. Musschenbroek (16') a concouru avec plusieurs physiciens contemporains à leur donner la forme qu'elles ont aujourd'hui. En voici le principe : Si l'on applique à chacun des pôles un morceau de fer doux d'une certaine épaisseur, au bout de quelque temps chaque pôle aura acquis un excès d'énergie, et par suite l'aimant entier sera capable de soutenir un poids plus considérable qu'auparavant. Ces appendices en fer doux constituent les armatures ou armures de l'aimant, dont les parties extrêmes forment les pieds.

Ces armures ont encore l'avantage de concentrer en quelques points toute l'action de l'extrémité d'un barreau qui a une certaine longueur.

Dans un aimant artificiel, rien n'est plus facile que de placer l'armature, puisque l'on sait où sont les pôles ; mais il n'en est pas de même dans un aimant naturel, où leur position est inconnue ; il faut commencer par la déterminer à l'aide de l'expérience.

§ III. *Propriétés des aimants et distribution du magnétisme. Travaux de Coulomb.*

Le physicien dont les recherches sur le magnétisme ont été les plus importantes vers la fin du siècle dernier et au commencement de celui-ci, est, sans contredit, Coulomb ; aussi le résumé de ses travaux peut-il représenter l'état de la science du magnétisme jusqu'à la découverte de l'électro-magnétisme.

On lui doit la détermination des lois qui régissent les attractions et répulsions magnétiques (17). Il a fait usage de deux méthodes, de même que pour déterminer les lois des attractions et répulsions électriques : la première consiste à suspendre une aiguille aimantée à un fil de cocon, et à lui présenter dans le méridien magnétique, à diverses distances, une autre aiguille aimantée, puis à déterminer par les oscillations de la première, et à l'aide d'une formule analogue à celle qui régit les mouvements du pendule, la force en vertu de laquelle les deux aiguilles agissent l'une sur l'autre.

La seconde méthode exige l'emploi de la balance de torsion, qui est un des instruments de physique les plus précis dont on puisse faire usage.

L'emploi de ces méthodes lui a montré que les attractions et répulsions magnétiques s'exercent en raison directe des quantités de magnétisme possédées par les éléments des barreaux aimantés, et en raison inverse du carré de la distance de ces éléments.

Jusqu'à Coulomb on ne possédait aucun moyen précis de déterminer la distribution du magnétisme dans les aimants; on se bornait à faire usage de limaille ou de petits poids en fer que l'on faisait adhérer aux différents points d'un barreau : Coulomb fit usage pour cette détermination de la balance de torsion (18). Il fixa à l'extrémité du fil de suspension une aiguille d'acier aimantée à saturation, et de telle sorte que le fil fût sans torsion quand l'aiguille aimantée se trouvait dans le méridien magnétique; puis il plaça dans le même plan une règle verticale de bois de trois ou quatre millimètres d'épaisseur, de manière que l'une des extrémités de l'aiguille venait s'y appliquer lorsque le fil était sans torsion; de l'autre côté de la règle, on faisait descendre verticalement, dans une rainure faite sur la surface, un second fil d'acier, semblable au premier et aimanté de même, de sorte que les pôles de même nom se correspondaient. L'aiguille mobile était d'abord chassée; mais on la ramenait au contact avec la surface de la règle en tordant convenablement le fil de suspension; on opérait successivement sur différents points, puis on comparait les forces de torsion. Coulomb est parvenu à reconnaître par ce moyen que le magnétisme libre est réuni presque en entier sur les huit premiers millimètres du fil, à partir des extrémités. En représentant géométriquement les quantités de magnétisme libre d'une aiguille par les ordonnées d'une courbe dont les distances de chaque point à l'une des extrémités sont les abscisses, cette courbe représente la distribution du magnétisme.

Coulomb a employé aussi la méthode des oscillations pour trouver la distribution du magnétisme libre sur une aiguille; à cet effet, il a remplacé le fil de torsion par un fil de cocon, et le fil d'acier mobile par une petite aiguille de boussole. En dérangeant celle-ci de sa position naturelle d'équilibre, elle y revient par les actions combinées de la terre et du fil vertical : la première étant proportionnelle au carré du nombre d'oscillations qu'elle exécute dans un temps donné, dans une minute, par exemple, lorsqu'elle est sou-

mise à l'action seule de la terre, si l'on cherche ensuite le nombre d'oscillations qu'elle fait dans le même temps lorsqu'elle est en présence de l'aiguille, on a la mesure de l'action exercée par ce fil, en retranchant le premier résultat obtenu, du carré du nombre d'oscillations trouvé en dernier lieu ; la différence sert de mesure à la quantité de magnétisme libre du point du fil qui se trouve à la hauteur de l'aiguille mobile.

Cette méthode ne peut s'appliquer aux points extrêmes ou qui en sont à peu de distance, attendu qu'il n'existe pas au delà de l'extrémité des points dont l'action devrait concourir à l'effet général ; cela fait que l'action éprouvée par l'aiguille n'est pas la même que si le fil était prolongé. Pour parer à cet inconvénient, lorsque l'on fait osciller l'aiguille à l'extrémité du fil, il faut doubler le nombre qui représente le carré des oscillations, pour que le résultat soit comparable à ceux que l'aiguille donne quand elle oscille devant les autres points. Le doublement doit donner un résultat un peu plus faible que le véritable ; c'est ce que M. Biot (19) a fait voir aussi par le calcul ; le doublement ne doit avoir lieu que pour le point extrême, car, pour les autres, l'erreur est d'autant plus grande que le point que l'on considère est plus éloigné.

La courbe des intensités est exactement la même, à diamètre égal, quelle que soit la longueur des fils, pourvu qu'ils aient plus de $0^{m},21$ à $0^{m},24$ de longueur ; elle ne fait donc que se transporter vers les extrémités quand les fils s'allongent. Coulomb a reconnu que, dans des aimants très-courts, les pôles, qui ne sont autres que les centres d'action de l'aiguille, étaient à peu près au tiers de la demi-longueur, et que cette valeur était une limite dont les pôles s'approchaient à mesure que la longueur de l'aimant diminuait.

M. Biot, en cherchant la relation qui existe entre les abscisses et les ordonnées de la courbe des intensités, a montré qu'elle pouvait être représentée par une équation logarithmique.

M. Becquerel (20) a trouvé que la distribution du magnétisme dans des fils très-fins d'acier de $\frac{1}{50}$ de millimètre de diamètre était la même que dans les fils ordinaires, ce qui montre que la distribution du magnétisme est semblable dans une série de molécules de matières placées sur une ligne droite comme dans un barreau ordinaire.

Coulomb, voulant connaître la distribution du magnétisme dans l'intérieur des aimants, prit un certain nombre d'aiguilles parallélogrammatiques rectangles dans la même tôle d'acier ; il les fit

chauffer à blanc sans les tremper, pour être assuré de les avoir toujours dans le même état; les ayant aimantées à saturation, il en forma des faisceaux, les pôles semblables étant du même côté; les aiguilles furent liées ensemble avec un fil de soie assez fort pour les serrer : il a trouvé que la force magnétique de chaque faisceau croissait dans un rapport beaucoup moindre que le nombre des lames.

Coulomb a observé encore qu'un faisceau de lames prend à peu près le même degré de magnétisme qu'une seule lame de même forme et de même poids, ce qui tendrait à faire croire que, dans les aimants d'une seule pièce, le magnétisme va en diminuant de la surface au centre, comme dans les aimants composés de plusieurs lames.

§ IV. *Action des aimants sur différents corps.*

Les physiciens du siècle dernier ont recherché si les aimants pouvaient exercer une action sur d'autres métaux que le fer ou bien sur quelques-unes de ses combinaisons et de ses alliages, c'est-à-dire si d'autres métaux ne se présentaient pas comme magnétiques. Dans les anciens Traités de physique on trouve, en effet, des tables indiquant le nom de substances ayant une action plus ou moins vive sur l'aiguille aimantée, ou même n'en exerçant aucune; on peut citer entre autres l'*Essai de physique* de Musschenbroek, publié en 1751. Depuis cette époque, parmi les physiciens qui se sont occupés de ces effets, on remarque Brugmann (21), qui, en 1778, chercha à imprimer une direction à des substances très-mobiles par l'influence de forts aimants : il reconnut que le cobalt manifeste une très-forte action magnétique; que le cuivre et le mercure sont faiblement attirés par l'aimant et le zinc un peu plus. Il a vu que le bismuth, de couleur foncée est repoussé par les pôles de l'aimant.

Lehmann (22) a cherché à prouver que les actions de ce genre étaient dues à un mélange de fer. Cavallo (23) fut d'une opinion contraire.

Coulomb (24) fit des expériences du même genre, mais en déterminant le rapport des forces exercées de la part d'un aimant sur des aiguilles d'or, d'argent, de plomb, de cuivre et d'étain, eu égard à la force de torsion d'un fil de cocon; puis il chercha, en faisant des mélanges de cire et de fer, quelle était la faible proportion de fer ou

de particules magnétiques nécessaires pour produire les mêmes résultats, et il trouva que la présence de $\frac{1}{183120}$ de fer dans les métaux supposés actifs suffisait pour leur donner une force directrice sensible entre les pôles d'un aimant. Ce physicien ne trouva pas dès lors de motifs suffisants pour se prononcer sur la cause des phénomènes et décider si tous les corps étaient magnétiques, à des degrés différents, ou bien s'ils ne devaient pas cette propriété à un mélange de fer. Cette opinion fut partagée par M. Biot, qui ne pensa pas que l'on pouvait décider l'alternative.

On voit donc que dans la période du magnétisme dont nous retraçons l'histoire, bien que des tentatives aient été faites pour montrer que d'autres corps que le fer obéissaient à l'action des aimants, on avait seulement constaté que le nickel et le cobalt étaient magnétiques comme le fer, mais qu'à l'égard des autres substances, les actions n'étaient pas assez manifestes pour décider à quelle cause elles devaient leur faculté d'être influencées par les aimants. Ce n'est que depuis cette époque, comme on le verra dans le cinquième chapitre, que cette question a pu être résolue à l'aide d'autres méthodes d'expérimentation; mais il n'en est pas moins vrai que Brugmann avait observé un fait qui paraissait isolé et auquel on fit peu d'attention, celui de la répulsion du bismuth par les deux pôles de l'aimant, fait qui devait se rattacher plus tard à des effets manifestés par un grand nombre de corps.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE III.

(1) *Lettre à M. le baron de Humboldt, sur l'invention de la boussole*, par J. Klaproth, p. 6 (1834).

(2) *Idem*, p. 34. — (3) *Idem*, p. 40. — (4) *Idem*, p. 7 — (5) *Idem*, p. 12.

(6) Duhalde, *Description de l'Empire de la Chine*.

(7) *La grande Collection des fabliaux et contes des douzième et treizième siècles*. Klaproth, ouvrage déjà cité p. 41.

(8) *Histoire hyérosolymitaine*. Vitry.

(9) *Lettre à M. de Humbold*, par Klaproth.

(10) Brisson, *Dictionnaire de physique*.

(11) *De Magnete*, etc., de G. Gilbert, Londres, 1600.

(12) *Philosophica magnetica*, de Nicolas Cabeo Ferrariensi (629).

(12[1]) *Idem*, p. 125. — (12[2]) *Idem*, p. 160. — (12[3]) *Idem*, p. 214.

(13) *Dictionnaire de physique*, de Brisson, p. 44.

(14) OEpinus, *Tentamen théoriæ electricitatis et magnetismi*, Pétersbourg, 1769.

(15) Biot. *Traité de physique mathématique.*

(16) *Idem.*

(16[1]) Musschenbroek, *Essai de physique*, p. 27, 1751.

(17) *Mémoires de l'Académie des sciences, de l'Institut de France*, t. VI, p. 399 (1789).

(18) *Idem*, p. 578.

(19) Biot. *Traité de physique mathématique.*

(20) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXII, p. 113.

(21) *Magnetismy seu de affinitatibus magneticis observationes Academiæ*, 1778, 4°.

(22) *De cupro et orichalco magnetico*, nov. com., petr. 12 *p.*, 368.

(23) *Treatise on magnetism*, 1787, p 283.

(24) *Journal de Physique*, t. XIV, p. 367 et 454 (1802).

CHAPITRE IV.

Électro-dynamique et électro-magnétisme.

§ I[er]. *Découverte d'OErsted et travaux d'Ampère.*

En 1820, une découverte capitale vint imprimer à l'électricité une impulsion nouvelle, comme avaient fait celles de Galvani en 1790, et de Volta en 1800. Cette découverte parut inopinément : on apprit à Paris, en juillet 1820 (1) qu'Œrsted, professeur de physique à Copenhague, guidé par des vues théoriques, publiées vingt ans auparavant, sur la constitution moléculaire des corps, venait d'annoncer dans un ouvrage écrit en latin (*Experimenta circa effectum*, etc.), qu'une aiguille aimantée, placée à peu de distance d'un fil de métal joignant les deux extrémités d'une pile, éprouvait de la part de ce fil une action révolutive telle que, si l'aiguille se trouvait au-dessus ou au-dessous, à droite ou à gauche, elle était aussitôt déviée à angle droit, dans un sens ou dans un autre, et s'inclinait en haut ou en bas, selon le sens de la décharge. Cette expérience fut faite par Œrsted en présence de ses élèves, sans préparation préalable, et le fait annoncé par lui comme une déduction de ses idées théoriques. Cette découverte causa une surprise d'autant plus grande que si, à diverses époques, on avait cru voir des rapprochements entre les effets des aimants et ceux de l'électricité, les essais tentés jusque-là, même ceux de Ritter, pour déterminer l'influence exercée par la pile sur l'aiguille aimantée, n'avaient donné aucun résultat satisfaisant.

A l'observation seule de ce fait qui, à la vérité, est du premier ordre, se borne la part qui revient à Œrsted dans la découverte de l'électro-magnétisme; il laissa à d'autres physiciens le mérite de compléter son œuvre, dont il a planté le premier jalon.

Ampère, aussitôt qu'il eut connaissance de l'expérience fondamentale d'Œrsted, commença une série de recherches dont les résultats réunis constituent l'électro-magnétisme (2).

Le 18 septembre 1820, il communiqua un premier mémoire à l'Académie des sciences, dans lequel il réduisit les phénomènes observés par Œrsted à deux faits principaux; il démontra que l'action de la force électro-dynamique existe également dans toutes les parties du fil conducteur, ainsi que dans la pile; il donna la loi générale qui détermine le sens de l'aiguille dans chaque cas particulier, en donnant le nom de direction du *courant* à celle suivant laquelle se meut l'électricité positive; il donna le moyen de reconnaître le sens du courant, afin qu'il n'y eût pas de confusion à cet égard entre les physiciens. Il décrivit dans le même mémoire les instruments qu'il se proposait de faire construire, particulièrement les spirales et les hélices qu'il annonça devoir produire les mêmes effets que les aimants; il exposa en même temps ses idées sur les propriétés des aimants, dues suivant lui à des courants électriques circulant autour des molécules, dans des plans perpendiculaires à leur axe. On voit donc que, dès l'origine de ses recherches, Ampère jeta les bases de l'électro-magnétisme; ses travaux ultérieurs n'ont été que les développements des vues exposées dans son premier mémoire.

Le 25 septembre, Ampère exposa à l'Académie des sciences le résultat de ses recherches sur les actions les uns sur les autres, des circuits parcourus par des courants électriques suivant qu'ils cheminent dans le même sens ou dans un sens différent, et le 9 octobre, il montra quelles étaient les actions exercées de la part des courants sur des circuits fermés.

Pendant qu'Ampère découvrait l'action des courants les uns sur les autres, et cherchait à établir l'identité entre le fluide électrique et le fluide magnétique, Arago (3) examinait l'espèce de modification qu'éprouve un fil de métal parcouru par un courant électrique; il plaça à cet effet, à peu de distance du fil, de la limaille de fer, qui fut attirée par le conducteur, et s'y déposa transversalement en formant des anneaux concentriques. La limaille tomba aussitôt que le courant fut interrompu. Bientôt après, par un procédé déduit des idées théoriques d'Ampère, il aimanta des aiguilles et des barreaux d'acier placés dans la partie intérieure d'un fil conjonctif enroulé en hélice sur une portion de sa longueur. En plaçant plusieurs hélices à la suite les unes des autres et dont les spires tournaient alternative-

ment en sens contraire, un fil d'acier placé dans leur intérieur fut aimanté, et présentait autant de points conséquents qu'il y avait eu de changements dans la direction des spires. Les effets furent les mêmes en se servant d'une pile, d'une machine électrique ou d'une bouteille de Leyde.

Davy (4) aimanta plus tard des petites aiguilles d'acier, en les frottant transversalement sur un fil conjonctif.

Le 30 octobre de la même année, Ampère (5) annonça à l'Académie que l'action du globe terrestre tendait à amener, dans un plan perpendiculaire à la direction de l'aiguille d'inclinaison, le plan d'une portion mobile du conducteur d'un appareil voltaïque, disposé de manière à former un circuit fermé.

M. Biot (6), lut dans la même séance un mémoire fait en commun avec Savart, sur l'action mutuelle des courants et des aimants, dans lequel ces deux physiciens firent connaître le caractère de la force électro-dynamique, c'est-à-dire la loi suivant laquelle cette force émanée du fil conjonctif s'affaiblit à diverses distances de son axe; ils reconnurent que la force exercée par le fil est transversale à sa longueur, et révolutive et qu'elle décroît dans un rapport exactement proportionnel à la distance. Laplace démontra que la loi individuelle de la force élémentaire de chaque partie du courant était en raison inverse du carré de la distance.

Le 6 novembre, Ampère fit connaître à l'Académie un fait relatif à l'action des conducteurs ployés en hélice, et qu'il avait remarqué avant d'en connaître la cause. Il en déduisit un moyen très-simple de neutraliser l'effet longitudinal d'un courant électrique, dans une hélice électro-dynamique, et d'en réduire l'action à l'effet transversal, qui se trouve alors identique à celui d'un aimant. Dans la séance du 4 décembre (7), il donna l'expression analytique des attractions et répulsions des courants électriques, en s'attachant à montrer que tous les faits relatifs à l'action mutuelle de deux aimants, d'un conducteur voltaïque et d'un aimant, ou de deux conducteurs, pouvaient être ramenés à une cause unique, consistant dans une force tantôt attractive, tantôt répulsive, entre les portions infiniment petites de ce qu'il a nommé *courants electriques,* mais agissant toujours suivant la ligne qui joint leur milieu. Il admit que l'action de cette force n'était pas seulement fonction de la distance, mais qu'elle dépendait aussi des angles qui déterminent la position respective des deux portions infiniment petites des courants électriques et de la ligne qui en joint les milieux.

Enfin, dans un dernier mémoire lu à l'Académie des sciences, les 8 et 9 janvier 1821, Ampère donna quelques essais de calcul relatifs à l'action mutuelle d'un fil conjonctif et d'un aimant.

On voit que, dans l'espace de cinq mois, Ampère, en partant du fait fondamental découvert par Œrsted, jeta les bases de l'électro-magnétisme, partie de la physique qui rattache les phénomènes magnétiques à l'électricité.

En 1821 (8), Faraday fit l'expérience de la révolution d'un fil conducteur autour du pôle d'un aimant, dont Wollaston avait eu l'idée (9); il réussit également à faire tourner un aimant parallèlement autour d'un fil conducteur traversé par un courant, mais il ne put parvenir à imprimer à un aimant un mouvement de rotation autour de son axe.

Ampère reconnut que la cause du non-succès (10) tenait à ce que le courant ne passait ni dans l'aimant, ni dans une portion du conducteur qui était solidement attachée ; en ayant égard à cette considération, il obtint le mouvement de rotation avec une grande vélocité.

Davy (10') ayant plongé dans du mercure les bouts de deux conducteurs en communication avec les deux extrémités d'une pile, et ayant approché l'un des pôles d'un aimant puissant près de la surface du mercure en contact avec ces conducteurs, il vit aussitôt le mercure prendre un mouvement de rotation rapide, dont le sens dépendait de la nature du pôle de l'aimant et de celui de la pile.

On a vu précédemment, qu'en faisant passer la décharge d'une très-forte pile entre deux pointes de charbon, il se produit un jet de lumière dont l'éclat est si vif que l'œil ne peut en supporter la vue. Davy ayant présenté un aimant à ce jet de lumière, ce jet éprouva une action semblable à celle d'un conducteur métallique mobile, c'est-à-dire qu'il en était attiré et repoussé selon le pôle en regard et le sens du courant. Cette expérience intéressante montre que l'arc voltaïque formé de matières transportées par le courant ou traversées par lui, et portées à l'incandescence, obéit à l'action des courants et des aimants comme un conducteur solide parcouru par l'électricité.

En même temps qu'Ampère découvrait les propriétés des hélices, M. Schweigger (11), en Allemagne, imaginait le multiplicateur ou galvanomètre, fondé sur le même principe. Cet appareil, qui sert à constater la production de très-faibles courants électriques, a permis d'analyser les effets électriques qui se manifestent dans un grand nombre de cas, et particulièrement dans les actions chi-

miques, où tout autre moyen avait été jusque-là insuffisant. La construction du galvanomètre varie suivant la source qui produit l'électricité dont on veut constater l'existence; en général, l'appareil se compose d'un châssis en bois ouvert sur deux faces, et autour duquel est enroulé un fil de cuivre recouvert de soie. Le diamètre et le nombre des circonvolutions dépendent de l'intensité du courant électrique. Une aiguille aimantée, suspendue à un fil simple de soie, est placée dans l'intérieur du châssis. Le courant électrique vient-il à circuler dans le fil, les actions individuelles que reçoit l'aiguille aimantée de chacune des circonvolutions du fil enroulé s'ajoutent, et produisent une résultante qui est assez considérable pour faire dévier l'aiguille aimantée, lors même que le courant initial est très-faible.

Ampère, en suivant les déductions de sa théorie, posa en principe que le globe terrestre se comporte dans son action sur les conducteurs et les aimants, comme s'il existait dans le globe des courants électriques cheminant de l'est à l'ouest; il montra quelles étaient les expériences qui venaient à l'appui de sa manière de voir. Quand nous exposerons les opinions émises sur les causes du magnétisme terrestre, nous dirons comment Ampère pensait que cette circulation pouvait avoir lieu.

M. Delarive père (11') a imaginé de petits couples munis de fils conducteurs enroulés en hélice, et qui, flottant sur l'eau acidulée, se dirigent sous l'action des aimants et sous celle de la terre. Ces petits conducteurs mobiles permettent de répéter très-simplement quelques-unes des expériences d'Ampère.

M. Delarive (12) publia à la même époque un mémoire touchant l'action de la force terrestre sur une portion mobile d'un circuit voltaïque fermé, dans lequel il fit connaître que cette action, dans un rectangle, par exemple, s'exerçait sur les portions verticales seulement; il établit alors cette loi générale, qu'un courant vertical, susceptible de tourner autour d'un axe vertical auquel il est lié, se dirige constamment de façon que le plan qui l'unit à son axe soit perpendiculaire au méridien magnétique, se plaçant lui-même à l'est s'il est descendant, à l'ouest s'il est ascendant.

De ce qu'un courant horizontal n'est pas affecté par le magnétisme terrestre, il ne s'ensuit pas pour cela que son action soit complétement nulle; cette action existe en réalité, et M. Delarive a trouvé qu'elle est soumise à la loi suivante : un courant horizontal, susceptible de se mouvoir parallèlement à lui-même, se meut de cette manière, dans un sens ou dans un autre, suivant sa propre direc-

tion ; ce mouvement a lieu dans toutes les positions où on le met, qu'il soit placé dans la direction du sud au nord, dans celle de l'est à l'ouest, ou dans toute autre direction intermédiaire.

A peine ces lois, qui se déduisaient de la théorie d'Ampère, furent-elles connues, qu'une polémique s'engagea entre Ampère, d'une part, Davy et Berzélius, de l'autre. Berzélius regardait comme improbable l'hypothèse avancée par Ampère, que les effets magnétiques du courant fussent dus à un mouvement en hélice des deux électricités; la polarité double du conducteur lui parut être une supposition plus simple et plus vraisemblable. Ampère répondit que les expériences mises en avant par Berzélius pour défendre son opinion rentraient également dans sa théorie, et que dès lors on ne devait pas chercher une autre explication que celle qui en découlait.

Davy, dans une lettre adressée à Ampère sous la date du 20 février 1821, lui mandait qu'il doutait que le magnétisme eût une origine électrique; Ampère combattit encore cette opinion, en s'appuyant sur sa théorie qui est aujourd'hui généralement adoptée.

Nous devons encore ajouter qu'en 1823 (13), Savary confirma cette théorie en montrant que des solenoïdes, ou cylindres électro-dynamiques d'un très-petit diamètre, agissaient à des distances très-grandes par rapport à ce diamètre, comme des aimants dont les pôles seraient situés à l'extrémité de ces diamètres.

Ampère (14), frappé des beaux travaux de Fresnel, sur la lumière, et surtout de l'accord des considérations sur lesquelles il s'appuyait et de celles qui s'étaient présentés à son esprit relativement à la cause des attractions et répulsions électriques, exposa ses idées à cet égard en ces termes : « Cet accord, disait-il, prouvait par « l'ensemble de ces phénomènes que le fluide répandu dans tout « l'espace, qui ne peut être que le résultat de la réunion des deux « électricités, était à peu près incompressible, traversait tous les « corps, et que les mouvements excités dans ce fluide s'y propa- « geaient par une sorte de frottement des couches déjà en mouve- « ment sur celles qui ne l'étaient pas. D'après cela, il était naturel « de penser que le courant électrique d'un fil conducteur ferait en « partie partager son mouvement au fluide neutre environnant, et « frottait en partie contre lui, de manière à donner naissance à une « réaction de fluide sur le courant, qui ne pouvait tendre à dépla- « cer celui-ci, tant que la différence de vitesse était la même de

« tous les côtés du courant électrique, mais qui devait tendre à se « mouvoir, soit du côté où cette différence de vitesse, et par consé- « quent l'action électrique serait moindre, soit du côté opposé à « celui où elle serait plus grande, parce qu'il s'y trouverait un autre « courant électrique, tendant à pousser le même fluide en sens « contraire, suivant que les deux courants qui agiraient l'un sur « l'autre seraient dirigés dans le même sens ou auraient des direc- « tions opposées. »

Nous avons cru devoir exposer avec quelques détails les travaux d'Ampère, à raison de leur haute importance, des vues théoriques qui en découlent et de leur originalité. Nous ferons remarquer que, s'il eût cherché à vérifier par expérience quels étaient les effets produits par les courants électriques sur les corps à l'état neutre, ainsi qu'il l'avait annoncé, il aurait enlevé à Faraday l'honneur de la découverte de l'induction.

Les phénomènes électro-dynamiques ont été envisagés sous différents points de vue par MM. Œrsted, Faraday et Pouillet (14'). On a d'abord attribué l'action des conducteurs voltaïques sur les aimants à une aimantation transversale acquise par ces conducteurs; mais cette hypothèse a été abandonnée quand on eut découvert le mouvement de rotation, continue dans le même sens. D'autres physiciens ont considéré la cause de ces phénomènes magnétiques comme entièrement distincts de l'électricité : ils ont voulu expliquer l'action mutuelle des conducteurs et des aimants, en admettant que chaque pôle d'un aimant ou d'une particule aimantée exerce sur un courant électrique une force constante perpendiculaire au rayon vecteur, etc., etc.; mais jusqu'ici la théorie d'Ampère a prévalu.

Quelques années après qu'Arago eut trouvé l'action exercée par un courant électrique sur le fer non aimanté, et que Davy eût montré que l'on pouvait aimanter des aiguilles d'acier en les frottant transversalement sur un fil de métal parcouru par un courant, Savary étudia l'aimantation des aiguilles d'acier, placées à diverses distances d'un fil de métal, dans lequel on fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde (15). Il trouva que ces aiguilles, placées du même côté, prennent une aimantation plus ou moins forte, selon la distance à laquelle elles se trouvent placées du fil conducteur; que les plus rapprochées ne sont pas toujours les plus aimantées, attendu qu'il existe à diverses distances du fil des points où l'aimantation est à son maximum, et d'autres à son minimum;

que la distance influe aussi sur le sens de la polarité. Il observa, en outre, que ces alternatives dans le sens du magnétisme se renouvellent plusieurs fois, et que leur nombre, tant sous le rapport du sens que sous celui de l'intensité, dépend en grande partie de la longueur et du diamètre du fil, ainsi que de la conductibilité et de l'énergie de la décharge électrique.

Savary s'est occupé également de l'influence qu'ont les métaux sur l'aimantation quand ils sont interposés entre les aiguilles et le fil conducteur.

A l'époque où Savary publia ses recherches, l'explication des alternatives parut difficile; mais maintenant on s'en rend compte en remarquant que les effets d'induction qui se manifestent au moment où la décharge commence et où elle finit étant de sens contraire, suivant que l'une ou l'autre prédomine, l'aimantation des aiguilles peut avoir lieu dans des sens différents.

Depuis ces recherches, l'aimantation du fer doux et de l'acier par les courants électriques, et même par les décharges, a été étudiée par plusieurs physiciens, parmi lesquels nous citerons notamment MM. Lipkens et Quetelet (16), M. Moll (17), M. Abria (18), MM. Lens et Jocobi (19), qui ont étudié les conditions diverses qui font varier l'intensité magnétique des électro-aimants, suivant la longueur du fil conducteur, la forme et le nombre des spires.

Ces deux derniers physiciens ont cherché à établir que l'aimantation dans le fer par les courants électriques est proportionnelle à l'intensité des courants et au nombre de spires des hélices magnétisantes; mais cette loi ne peut être considérée comme exacte qu'entre certaines limites, car la puissance que l'on peut donner aux électro-aimants à l'aide de courants électriques énergiques ne semble pas croître indéfiniment : d'après les recherches de MM. Joule, de Haldat, Feitzlich, Muller, le fer possède une limite de développement de magnétisme, limite qui dépend de l'intensité du courant électrique et du diamètre du fer soumis à son action. Les recherches de M. Muller (20) ont surtout précisé l'existence de ce maximum d'aimantation que ne peut dépasser chaque barreau de fer doux, et qui est proportionnel au carré de son diamètre. L'existence de ce maximum n'est pas favorable à la théorie des deux fluides magnétiques, puisque cette théorie suppose dans les corps la présence d'une quantité indéfinie de fluide naturel, comme on le verra plus loin; il est favorable, au contraire, à l'hypothèse d'Ampère, car il doit être atteint quand les courants électriques que l'on

suppose devoir circuler autour des particules des corps magnétiques sont devenus tous parallèles à l'axe de l'aimant.

Nous devons citer encore parmi les physiciens qui se sont occupés de faire varier les formes des électro-aimants, et qui ont étudié les différentes conditions de l'aimantation, MM. Dub, Poggendorf, Nickles et Dumoncel.

§ II. *Galvanomètre et boussoles électro-magnétiques.*

On a vu, page 74, que l'on devait la première idée du galvanomètre multiplicateur, appelé aussi *rhéomètre* (mesureur du courant), à M. Schweigger, (21). Cet appareil étant d'une grande utilité pour étudier le dégagement d'électricité dans les actions mécaniques, physiques et chimiques, on a cherché à en augmenter la sensibilité, et à le perfectionner de manière à ce qu'il pût non-seulement indiquer la présence d'un courant électrique, mais encore en mesurer l'intensité avec une certaine exactitude.

Nobili (22) est celui qui a apporté les plus grands perfectionnements à cet appareil sous le rapport de la sensibilité; pour détruire en partie l'action terrestre, au lieu d'une aiguille aimantée, il a employé un système de deux aiguilles semblables, placées dans une position parallèle, les deux pôles inverses en regard, et fixées aux extrémités d'une tige très-légère. On ne laisse à ce système qu'une force directrice suffisante pour le ramener dans le méridien magnétique quand on l'en écarte. Ce galvanomètre est pourvu de tous les accessoires qui en font un instrument très-utile.

En enroulant autour de la caisse du galvomètre deux fils égaux au lieu d'un seul, on a le galvanomètre différentiel, qui est dû à M. Becquerel (23), et dont on se sert dans beaucoup de cas, principalement quand on veut comparer les effets résultant de l'action de deux sources électriques, ou bien les pouvoirs conducteurs des corps pour l'électricité.

Il est important, quand on veut utiliser ces appareils comme instruments mesureurs, de former une table des intensités qui donne l'intensité d'un courant correspondant à une déviation donnée. Différentes méthodes ont été employées, pour former ces tables, par MM. Becquerel, Peltier, Nobili et Melloni; mais elles ont été peu employées depuis la découverte des boussoles des sinus et des tangentes, du magnétomètre et de la balance électro-magnétique,

dont on fait usage lorsque l'on veut mesurer avec une grande exactitude l'intensité d'un courant électrique.

Le principe qui a servi à la construction de la boussole des sinus est dû à M. de la Rive (24); mais c'est à M. Pouillet (25) que l'on doit la forme sous laquelle elle est connue maintenant. Cette boussole, qui n'est autre qu'un galvanomètre multiplicateur ou rhéomètre, est construite de telle sorte que l'on peut ramener le plan du fil conducteur qui entoure le cadre du multiplicateur, dans le méridien de l'aiguille, lorsque celui-ci se dévie; le sinus de l'angle que l'on a fait décrire à ce plan mesure l'intensité du courant.

La boussole des tangentes est construite sur les mêmes principes que celle des sinus, si ce n'est que le cercle autour duquel le fil est enroulé est beaucoup plus grand, et que l'aiguille aimantée est très-petite. Le plan du cercle autour duquel est enroulé le fil, et qui est placé dans le méridien magnétique est fixe; lorsque l'aiguille aimantée est déviée par l'influence d'un courant, l'intensité de celui-ci est proportionnelle à la tangente de la déviation. Cette proportionnalité n'a lieu qu'autant que l'aiguille est très-petite relativement au diamètre du cercle. Comme on ne peut atteindre la limite, M. Despretz (26) a proposé une formule qui permet de faire usage de cet instrument sans remplir cette condition. Ce physicien a montré également que des boussoles dont le cercle a 1 mètre de diamètre, et l'aiguille aimantée 30 millimètres de longueur, donnent des déviations dont les tangentes sont sensiblement proportionnelles aux intensités des courants. Des dispositions particulières pour remédier au défaut de proportionnalité ont été proposées par MM. Poggendorf (27), Weber (28), Lenz (29), Péclet, Gaugain (30) et Bravais. La boussole des sinus néanmoins est préférée à celle des tangentes, en raison de l'exactitude de la loi qui régit ses indications.

Le magnétomètre de Gauss, destiné primitivement aux observations magnétiques, a été employé par M. Weber, sauf diverses modifications, pour mesurer très-exactement les petites déviations d'un fort barreau aimanté substitué à l'aiguille ordinaire placée au milieu du cadre du multiplicateur; comme les déviations ne dépassent pas une certaine amplitude, elles restent proportionnelles aux intensités des courants. On détermine les déviations au moyen de la réflexion dans un miroir lié invariablement au barreau aimanté dont il suit tous les mouvements, des divisions d'une mire fixe placée à une certaine distance, lesquelles vien-

nent se placer successivement dans l'axe optique d'une lunette. M. Wéber (31) s'était servi du même principe et du mode de suspension bifilaire, pour mesurer avec une grande précision l'action mutuelle de deux anneaux électro-dynamiques ou de deux solénoïdes.

La balance électro-magnétique imaginée par M. Becquerel (32) donne des résultats d'une très-grande exactitude; elle se compose d'une balance trébuchant à moins de 0g,001, à chacun des plateaux de laquelle est attaché, au moyen d'un fil de soie, un barreau aimanté entouré à distance par une hélice électro-dynamique placée verticalement. Quand on veut opérer, les fils des deux hélices sont mis en communication avec la source d'électricité, de manière que le courant circulant dans l'une d'elles fasse remonter le barreau qui s'y trouve engagé, et descendre l'autre quand ce courant parcourt la seconde hélice; la balance venant à trébucher, on rétablit l'équilibre des plateaux avec des poids. Les rapports des poids nécessaires pour équilibrer la balance sont exactement proportionnels aux rapports des intensités des courants qui circulent dans les fils des hélices.

Chacun de ces appareils peut être employé suivant les travaux à exécuter, et nous verrons par la suite que leur usage, joint à celui des effets physiques et chimiques dus à l'électricité, a puissamment contribué aux progrès de la science.

§ III. *Magnétisme par rotation. — Induction.*

Magnétisme par rotation. Les expériences faites par plusieurs physiciens, et surtout par Coulomb et par M. Becquerel (33), avaient montré que d'autres corps que le fer pouvaient être influencés par les aimants; mais Arago, en 1824 (34), découvrit que, lorsque les corps sont en présence, et que leur action sur l'aiguille aimantée n'est pas sensible à l'état de repos, au moment où le corps ou bien l'aimant est en mouvement, il se manifeste aussitôt un effet. Il observa d'abord que l'amplitude des oscillations d'une aiguille aimantée est influencée par le voisinage des substances qui l'entourent et surtout des métaux; les oscillations ne diminuent pas dans leur vitesse, mais bien dans leur amplitude, comme si elles avaient lieu dans un milieu plus dense que l'air. Cette observation le conduisit à la découverte d'un autre mode d'action qui est très-remarquable, et qui a reçu le nom de *magnétisme par rotation* (34') :

Ayant placé une aiguille aimantée, librement suspendue et pou-

vant se mouvoir dans un plan horizontal, au-dessus d'un disque de cuivre auquel il imprima un mouvement de rotation (en ayant soin de séparer les deux corps au moyen d'un écran, pour éviter les effets que pouvait occasionner l'agitation de l'air), il vit aussitôt l'aiguille se dévier d'un angle d'autant plus grand que le mouvement était plus rapide, et suivre même le mouvement du disque quand sa vitesse était suffisante. Arago remarqua aussi que l'action de l'aiguille était diminuée sensiblement quand le disque de cuivre avait des solutions de continuité dans le sens des rayons.

Aussitôt après cette découverte l'expérience fut répétée, commentée et analysée. On pensait que les pôles de l'aiguille aimantée, en réagissant sur le disque en rotation, y produisaient un magnétisme passager, dont l'existence était de quelque durée, et déterminait le transport de l'aiguille; de là la dénomination donnée à l'effet produit. Arago analysa le phénomène, et fit connaître la direction de la résultante de l'action du disque sur l'aiguille.

Nobili et Bacelli (35) publièrent, immédiatement après, les résultats de plusieurs expériences qui étaient en opposition avec les précédentes conclusions, entre autres, que les corps non métalliques ne produisaient aucun effet. Arago (35¹) répondit de suite, pour montrer que le verre et d'autres corps du même genre donnaient lieu à des effets moins sensibles il est vrai, mais appréciables.

Herschel et Babbage (36) répétèrent l'expérience d'une manière inverse : ils firent tourner un disque de métal librement suspendu par son centre, en imprimant un mouvement de rotation à un aimant placé au-dessous. Ils soumirent à l'expérience des plaques de différents métaux, pour déterminer la différence d'action qui résulte de la nature du métal. Ils constatèrent un fait remarquable : si l'on rétablit la continuité d'une plaque découpée, en remplaçant les intervalles vides avec un métal dont l'influence magnétique dans l'état de mouvement soit très-inférieure à celle de la plaque, cette plaque hétérogène reprend toute l'énergie magnétique qu'elle possédait avant qu'on l'ait rendue discontinue.

Seebeck, immédiatement après les premières expériences d'Arago, fit osciller une aiguille horizontale le plus près possible des plaques de diverses substances solides et liquides, afin de déterminer celles qui diminuaient le plus l'étendue des oscillations de l'aiguille.

On doit également à MM. Christie (37), de Haldat (38), Barlow, (38¹), Prévost et Colladon, Harris, des observations importantes sur le magnétisme par rotation.

Ampère, aidé de M. Colladon, trouva qu'un disque en mouvement agit sur une hélice métallique dans laquelle on fait passer un courant, de même que sur un aimant.

On ne connut la cause de ces phénomènes que plus tard, en 1831, après la découverte des phénomènes d'induction. En effet, M. Faraday a prouvé que l'aiguille aimantée donne lieu à des courants électriques par induction dans le disque en mouvement, courants dont il est même parvenu à démontrer l'existence. Nobili et Antinori (39) ont étudié ensuite la direction des courants produits dans les disques en mouvement.

Depuis cette époque, on peut citer comme travaux relatifs au magnétisme par rotation ceux de MM. Abria (39[1]) et Matteucci (40); ce dernier physicien, surtout, a déterminé avec précision la position des différents courants électriques développés par l'influence des aimants dans les disques mis en rotation.

Induction. OErsted et Ampère avaient découvert, l'un que l'action de l'électricité développait la puissance magnétique à l'aide d'un fil réunissant les deux pôles d'une pile, l'autre que les courants électriques convenablement disposés produisaient les mêmes effets que les aimants; M. Faraday trouva que l'inverse avait lieu, et que l'on pouvait produire de l'électricité dans les corps conducteurs aussi bien par l'action des aimants que par celle des courants agissant à distance.

Les premières expériences pour produire des courants électriques par l'influence d'autres courants sont dues à Ampère (40[1]); une lame de cuivre pliée en cercle, ayant été suspendue au milieu d'une ceinture de forts courants électriques, fut influencée par ceux-ci de telle sorte qu'en présentant à l'un des côtés de cette lame un très-fort aimant en fer à cheval, Ampère vit celle-ci s'avancer tantôt entre les deux branches de l'aimant, tantôt au contraire en être repoussée, suivant le sens du courant; l'aimantation du cuivre était passagère. Ampère (40[2]), dans un autre mémoire, résumait ainsi le fait qu'il avait observé : « *Il s'établit dans un conducteur mobile formant une circonférence complétement fermée un courant électrique par l'influence de celui qu'on produit dans un conducteur fixe, circulaire et redoublé, placé très-près du conducteur mobile, mais sans communication avec lui.* »

Ampère se borna à constater le fait; mais ce fait prouve que dès 1822 il avait reconnu la production des courants électriques par influence. C'est à M. Faraday (41), au surplus, que revient l'honneur

d'avoir analysé les circonstances dans lesquelles l'électricité en mouvement se produit à distance sous l'influence des courants électriques ou du magnétisme, et d'avoir recueilli l'électricité dégagée. L'annonce de cette découverte fut faite à l'Académie des sciences de l'Institut de France par M. Hachette, le 17 décembre 1831, d'après une lettre de M. Faraday; les phénomènes remarquables qui s'y rattachent forment une partie très-importante de la science de l'électricité, laquelle est connue sous le nom d'*induction*, en même temps qu'ils confirment les vues théoriques d'Ampère sur la constitution des aimants et sur l'identité des effets des courants électriques et de ceux des aimants.

L'induction est donc le pouvoir que possèdent les courants électriques d'exciter dans la matière qui est dans sa sphère d'activité un état particulier qui produit d'autres courants. M. Faraday, pour mettre en évidence ce phénomène, enroule en hélice sur un cylindre de bois deux fils de cuivre semblables recouverts de soie : une des hélices est mise en communication avec un multiplicateur, et l'autre avec une pile d'une certaine énergie; il se produit alors une légère déviation de l'aiguille aimantée du multiplicateur au moment où le courant commence à circuler dans le fil, lequel cesse immédiatement après. En interrompant le circuit, nouvelle déviation, mais en sens inverse. Les effets d'induction ou les *courants induits* dans le fil isolé n'ont donc lieu qu'à l'instant où commence et à l'instant où cesse le courant électrique *inducteur* qui circule dans le fil voisin. M. Faraday en conclut que ces courants, qui n'ont qu'une existence presque instantanée, comme Ampère l'avait observé, participent plus de la nature du courant électrique produit par la décharge de la bouteille de Leyde que de celle du courant qui prend naissance dans l'action de la pile.

Le courant induit produit par le courant inducteur, ou initial, à l'instant où l'on ferme le circuit, est dirigé en sens contraire de celui-ci; celui qui a lieu lors de la cessation du courant inducteur chemine dans la même direction que ce dernier. Les deux courants d'induction qui n'ont qu'une durée très-courte sont donc dirigés en sens contraire l'un de l'autre; comme on rapporte les effets à la direction du courant inducteur, le premier est nommé courant induit inverse; le second, courant induit direct.

M. Faraday chercha ensuite si les aimants qui, suivant la théorie d'Ampère, étaient le résultat de courants électriques circulant perpendiculairement à l'axe des pôles autour des molécules, ne pro-

duiraient pas des effets semblables. Pour savoir jusqu'à quel point cette conjecture était fondée, il prit un anneau formé avec une barre ronde de fer, sur l'un des côtés duquel il enroula autour d'une partie un fil de cuivre recouvert de soie. Il appliqua de la même manière, de l'autre côté de l'anneau, un fil semblable dirigé dans le même sens que le premier. Cette dernière hélice fut mise en rapport avec un multiplicateur, et l'autre avec une pile : au moment du passage du courant de la pile, l'aiguille aimantée du multiplicateur fut déviée, et beaucoup plus qu'en employant une pile de force décuple et des hélices sans anneau de fer ; l'aiguille reprit bientôt sa position naturelle d'équilibre. En interrompant la communication de la première hélice avec la batterie, l'effet fut inverse. Il obtint de semblables effets avec des électro-aimants ordinaires.

En plaçant un morceau de charbon bien recuit et effilé à chacune des extrémités du fil qui avaient été mises en rapport avec le multiplicateur, et rapprochant les deux bouts effilés, de manière à les mettre en contact, il aperçut une petite étincelle électrique, à l'instant où le circuit fut fermé. Rarement il put voir l'étincelle quand le contact avec la pile cessait. Ainsi les effets de lumière, comme l'action magnétique exercée sur l'aiguille aimantée, ont mis en évidence l'action inductrice produite.

Il reconnut qu'une seule hélice induite pouvait donner lieu à ces phénomènes, en la mettant en relation avec un multiplicateur, et en exerçant sur elle une influence magnétique à l'aide d'un barreau aimanté ordinaire, qu'on approchait ou qu'on éloignait ; les phénomènes d'induction ne se manifestaient donc qu'au moment où l'influence magnétique commençait ou cessait, ou pendant ses variations d'intensité, de même qu'en exerçant l'influence à l'aide d'un courant électrique. L'action était plus énergique quand une barre en fer doux était placée au milieu de l'hélice.

M. Faraday trouva également que si, au commencement de l'action inductrice, le courant secondaire produit par l'influence d'un aimant avait une direction contraire à celle du courant qui aurait été employé pour développer dans le fer doux un magnétisme de même polarité que le magnétisme produit par influence, au moment où celle-ci cessait, l'effet était de même sens : telles sont les premières expériences faites pour obtenir de l'électricité avec des aimants.

M. Faraday, pour expliquer les phénomènes d'induction, supposa un nouvel état électrique dans la matière : lorsqu'un fil de métal

est soumis à l'induction volta-électrique ou magnéto-électrique, il paraît être dans un état de tension particulier, puisqu'il résiste à la formation d'un courant électrique, qui n'a réellement lieu qu'à l'instant où commence et cesse cet état particulier auquel il a donné le nom d'*électro-tonique*, état équivalant à un courant électrique au moins égal au courant qui est produit lorsque l'induction a lieu ou cesse.

Un courant électrique excitant un état électrique particulier dans un fil métallique voisin doit nécessairement en produire un semblable dans son propre fil; M. Faraday (41[1]) a mis ce fait en évidence en faisant connaître ce que l'on nomme les *extra-courants* inverses et directs, c'est-à-dire les courants induits produits dans le circuit même du courant inducteur. Mais, nous devons faire remarquer que lorsqu'un courant électrique circule dans une hélice qui entoure un morceau de fer, il se manifeste entre les extrémités du fil, au moment de la rupture du circuit, une étincelle due à l'extra-courant direct, étincelle observée d'abord par M. Henri en 1832, puis par MM. Jenkins, Faraday et Masson.

M. Faraday émit l'opinion que, lorsque les courants électriques traversent les corps, ceux-ci subissent l'état électro-tonique, auquel il faut rapporter les décompositions électro-chimiques. Enfin il prouva le premier que les phénomènes du magnétisme par rotation observés par Arago étaient dus à l'action exercée par les courants induits excités dans le métal en mouvement par l'aimant voisin, lesquels réagissaient sur cet aimant pour le déplacer. Nous avons dit plus haut, page 83, que les recherches faites depuis avaient confirmé cette explication malgré la complication du phénomène.

Induction par les courants électriques. On doit à M. Henry (42), une étude approfondie de l'induction due à des courants induits de divers ordres, à laquelle il s'est livré immédiatement après les recherches de M. Faraday. M. Henry a trouvé que lorsqu'un fil conducteur est traversé par un courant induit, il se développe dans un second fil placé dans sa sphère d'activité un autre courant induit instantané, ou courant induit du deuxième ordre; on peut obtenir ainsi des courants du troisième et du quatrième ordre dans d'autres circuits placés successivement dans le voisinage l'un de l'autre.

Lés recherches de M. Henry ont conduit aux conséquences suivantes : les courants induits d'ordres supérieurs n'agissent que très-faiblement sur l'aiguille du multiplicateur, lors même que les effets physiologiques et l'action magnétisante sont très-considérables. Il a

été amené par là à considérer ces courants comme formés de courants successifs de directions opposées, égaux en quantité, mais différents en durée. Le courant induit du premier ordre, par exemple, donne par induction dans un conducteur voisin un courant induit du second ordre inverse au moment où il commence, et un courant direct à l'instant où il finit; ces deux courants se succédant très-rapidement et étant produits par des quantités égales d'électricité, leurs actions sur l'aiguille aimantée se détruisent, tandis que les effets physiologiques, c'est-à-dire les contractions et les commotions, s'ajoutent. Quant aux propriétés magnétiques, elles résultent de la différence de durée des deux courants successifs, c'est-à-dire du plus ou moins de tension qui en résulte; ainsi l'aimantation peut présenter des effets inverses.

M. Abria (43) a confirmé cette théorie, en faisant passer dans le fil d'un galvanomètre les courants induits du second ordre développés par une succession rapide de courants induits du premier ordre de direction constante; il en est de même de M. Verdet (44), qui, à l'aide des courants induits du deuxième ordre a produit des effets de polarisation résultant d'actions électro-chimiques.

Parmi les recherches qui ont été faites sur l'induction par les courants, nous devons citer celles de M. Masson (45); ce physicien, en 1837, s'était occupé de la production de l'extra-courant; depuis il a étendu ses recherches et a prouvé, entre autres, que si tous les courants électriques, quelle que soit leur tension, produisent des phénomènes d'induction, cependant les courants qui ont le plus de tension sont directs pour le courant secondaire et inverses pour les courants des autres ordres.

Induction par les décharges électriques. M. Henry pensa le premier que des décharges électriques, n'étant que des courants de très-courte durée, devaient induire dans des conducteurs voisins des courants électriques; mais, dans ce cas, les courants induits directs et inverses se succédant rapidement, l'un ou l'autre pouvaient prédominer suivant que l'un d'eux, éprouvant un retard, diminuerait de tension. Des recherches nombreuses ont été faites sur ce sujet, et elles n'ont pas produit toutes des résultats bien concordants, en raison même de la cause dont nous venons de parler.

Les procédés mis en usage pour étudier le sens et l'intensité des décharges électriques sont de différentes sortes : M. Marianini (46) a imaginé l'appareil nommé *ré-électromètre,* qui consiste en une hélice contenant un morceau de fer et dans laquelle

passe la décharge que l'on étudie; une aiguille aimantée, libre de se mouvoir au-dessus de l'hélice, indique, par sa déviation, le sens de l'aimantation du fer intérieur, et par conséquent de la décharge prédominante. Ce physicien a trouvé, à l'aide de son appareil, que la décharge induite prédominante a la même direction que la décharge inductrice, quand la bouteille de Leyde qui donne naissance à celle-ci a une capacité suffisante et qu'elle est bien chargée ; mais si la tension de la charge diminue, ou bien, à égalité de charge, si la dimension de la bouteille augmente, la décharge induite a une direction opposée.

D'autres méthodes ont été employées par les physiciens qui se sont occupés de ce sujet : M. Matteucci (47) a fait usage de l'aimantation des aiguilles d'acier et du procédé du perce-carte; M. Riess (48) s'est servi du condensateur, qu'il a chargé par induction, et a utilisé le phénomène des figures de Lichtemberg dessinées sur des gâteaux de résine, pour fixer du soufre ou du minium projeté à l'aide d'un soufflet sur les parties différemment électrisées du gâteau, suivant la nature de l'électricité; M. Knochenhauer a utilisé l'échauffement des fils métalliques lors du passage des décharges induites, et M. Verdet (44), comme on l'a déjà vu plus haut, a fait usage des phénomènes de polarisation électro-chimiques.

Toutes les expériences ont mis en évidence que tantôt le courant induit direct ou le courant inverse prédomine, comme du reste les résultats obtenus par Savary, bien antérieurement à la découverte de l'induction, l'avaient prouvé (voir page 77), puisque ce dernier avait observé qu'à égalité de charge, l'aimantation produite par les décharges électriques variait de sens avec la distance du fil parcouru par la décharge à l'aiguille aimantée; mais les causes qui font prédominer l'un ou l'autre de ces deux courants ne sont pas suffisamment connues.

Induction par l'influence magnétique de la terre. Nous avons vu que M. Faraday avait montré, dès l'origine de ses recherches sur l'induction, qu'un barreau aimanté pouvait induire des courants électriques dans des corps conducteurs placés à distance; mais la terre pouvant être assimilée à un aimant devait produire également des phénomènes d'induction : ce fait a été mis en évidence par M. Faraday, puis étudié par divers physiciens, et notamment par MM. Palmieri et Linari.

Pour manifester l'induction terrestre, il suffit de placer une hélice en rapport avec un multiplicateur, dans le méridien magnétique, et de la faire tourner autour d'un axe perpendiculaire à cette hélice,

et en son milieu, de manière que chaque fois la longueur corresponde à la direction de l'aiguille d'inclinaison; on augmente beaucoup l'intensité de l'effet en introduisant dans l'hélice un barreau de fer doux qui, à chaque mouvement de rotation de celle-ci, s'aimante momentanément sous l'influence de la terre.

MM. Palmieri et Linari (49) sont parvenus à former une pile qui fonctionne sous l'influence terrestre, et qu'ils ont appelée magnéto-électro-tellurique, laquelle imprime des déviations beaucoup plus fortes que celles que l'on obtient dans l'expérience précédente.

Il résulte de ces effets qu'un corps conducteur ne peut se mouvoir à la surface du globe sans qu'il se produise dans sa masse des courants d'induction.

Effets divers relatifs à l'induction. Lors de la production des courants induits, la présence de corps conducteurs qui sont également parcourus par des courants induits, lesquels peuvent réagir sur ceux que l'on étudie, change les conditions de la formation de ces derniers. Savary, dans ses recherches sur l'aimantation par les décharges électriques (voir page 78), avait observé déjà l'influence des enveloppes conductrices; MM. Henry et Abria ont étudié quels étaient les effets produits, et M. Riess a montré que l'échauffement d'un fil conducteur parcouru par une décharge était modifié par la présence d'un conducteur voisin.

M. Dove a fait une étude particulière de ce sujet (50) et est arrivé à des résultats très-intéressants; en employant les courants électriques et les décharges pour produire l'induction, il a obtenu des résultats concordants. Il a d'abord distingué, comme M. Henry, la durée du courant, de son intensité, car si les indications galvanométriques et les effets chimiques sont proportionnels entre eux et à la quantité d'électricité mise en jeu, l'effet physiologique comme l'effet calorifique ne le sont plus; l'effet physiologique, en particulier, ne dépend que de la rapidité de la neutralisation des électricités, car les secousses de la bouteille de Leyde prouvent qu'une très-petite quantité d'électricité qui se meut très-rapidement donne une commotion très-vive, alors que la même quantité d'électricité qui est neutralisée plus lentement ne produit aucun effet.

M. Bachhoffner et Sturgeon avaient trouvé qu'en plaçant au milieu d'hélices magnétisantes des faisceaux de fils de fer, l'extra-courant induit dans le circuit par l'aimantation et la désaimantation du fer produisait des secousses plus fortes que des cylindres de fer massifs. M. Dove a montré que cet effet tenait à ce que les cylin-

dres massifs agissaient comme noyaux magnétiques et comme corps conducteurs ; il se produisait alors, autour des cylindres, des courants induits qui retardaient l'induction, c'est-à-dire qui augmentaient la durée des décharges induites : de là, diminution d'effet physiologique, et augmentation quand on évitait la circulation des courants lors de la substitution des faisceaux de fils de fer isolés aux cylindres continus de fer.

M. Dove a également prouvé que les enveloppes conductrices en cuivre ou autres substances agissent de même, et que ces enveloppes n'affaiblissent pas le pouvoir d'induction, mais retardent seulement celle-ci en augmentant la durée du passage de l'électricité. Ce même physicien a fait également remarquer, d'après cela, qu'un faisceau de fils de fer aimanté s'approche le plus possible de la réalisation du solénoïde d'Ampère, qui toutefois ne représente pas un aimant ordinaire, puisque celui-ci est pourvu d'une enveloppe conductrice continue qui n'existe pas dans le cylindre électro-dynamique.

Lors de la production d'un courant induit, il se manifeste des effets statiques très-prononcés qui dépendent de la tension du courant, de la rapidité du passage de l'électricité, de la longueur et de l'isolement du fil conducteur. Ce fait important, signalé par M. Faraday, a été parfaitement établi par MM. Masson et Breguet (51), au moyen d'un long fil isolé, enroulé autour d'une bobine, et constituant une hélice ; en aimantant l'hélice à l'aide d'un faible courant électrique, le courant induit qui se produit au moment où le courant est fermé, mais mieux au moment où il est ouvert, c'est-à-dire dans ce dernier cas l'extra-courant direct, peut charger un condensateur, donner des secousses et produire des étincelles dans le vide de la machine pneumatique. Si l'on fait toucher les deux extrémités du fil de la bobine avec les deux tiges métalliques d'un œuf électrique, et que l'expérience ait lieu dans l'obscurité, la boule qui touche à l'extrémité qui donne l'électricité positive est le point de départ d'une gerbe lumineuse, rouge-violacée ; la boule négative est entourée d'une auréole lumineuse bleuâtre. MM. Masson et Breguet ont émis l'opinion qu'on pourrait augmenter ces effets, et arriver à construire des appareils qui remplaceraient, dans certains cas, les machines ordinaires pour la production de l'électricité statique : nous verrons plus loin qu'il existe un appareil d'induction qui a permis d'atteindre ce but.

D'autres physiciens se sont aussi occupés des effets d'induction ;

parmi eux nous pouvons citer MM. Lenz, Weber, Neuman, Delarive, Matteucci, Poggendorf, Wartman, Marié, Felici, qui ont étudié les effets généraux que manifestent les courants induits et les conditions nécessaires à leur développement. M. Lenz (51[1]) a établi la loi suivante : « Lorsqu'un courant est induit par le mouvement relatif d'un conducteur et d'un courant ou d'un aimant, l'action inductrice tend à développer dans chaque élément du conducteur un courant dirigé de telle façon que sa réaction électro-dynamique sur le courant ou sur l'aimant tende à produire un mouvement contraire au mouvement réel. » Nous ajouterons encore que M. Lallemand (52) a démontré que les courants instantanés induits s'attirent et se repoussent les uns les autres comme les courants continus et suivant les mêmes lois.

M. Faraday a observé le premier que les courants induits qui se manifestent dans les corps conducteurs soumis à l'influence de forts aimants, pouvaient donner lieu à des effets particuliers : en suspendant à un fil de soie un petit cube ou bien une sphère en cuivre rouge ou en argent, et le plaçant entre les pôles d'un fort électro-aimant, si on tord à la main le fil de soie, et que l'électro-aimant ne soit pas aimanté, la masse métallique reçoit un mouvement de rotation ; mais, aussitôt que l'électro-aimant est aimanté, la masse métallique cesse de tourner ou semble se mouvoir dans un milieu résistant. Cet effet est dû à des courants induits qui circulent dans la masse métallique à l'instant où elle se met en mouvement entre les pôles magnétiques. Les métaux mauvais conducteurs de l'électricité ne présentent pas d'effets appréciables.

Les courants électriques qui se manifestent dans des conditions analogues peuvent donner lieu à une élévation de température : Aussi M. Joule (52[1]) a-t-il fait usage de courants induits développés pour déterminer la quantité de travail mécanique qu'il était nécessaire de communiquer à un conducteur mobile pour produire une quantité de chaleur déterminée, quantité de travail que l'on a appelée *équivalent mécanique de la chaleur*. Nous devons faire remarquer, ainsi qu'on le verra dans le chapitre suivant, que M. Van Breda avait observé que l'aimantation dans le fer était accompagnée d'un effet calorifique, quoique faible. M. Foucault (52[2]) a montré également qu'en faisant tourner un disque de cuivre rouge entre les faces polaires d'un électro-aimant, la température de ce disque s'élève en raison des courants induits qui circulent dans la masse conductrice.

Appareils d'induction. Depuis les recherches de M. Faraday, on a cherché à construire des appareils dans lesquels on pût produire des courants par induction dirigés dans le même sens ou en sens contraire, et cela à l'aide d'aimants naturels ou d'électro-aimants. Suivant que les premiers ou les seconds ont été employés, les appareils construits ont reçu le nom d'appareils magnéto-électriques ou d'appareils électro-magnétiques : avec les premiers, on produit donc de l'électricité sous l'influence des aimants seuls.

Le premier appareil d'induction magnéto-électriques résulte des dispositions employées par M. Faraday dans ses premières expériences ; il consiste en un disque de cuivre qui tourne entre les branches d'un électro-aimant ; en fixant l'extrémité d'un fil conducteur au centre du disque, l'autre frottant sur la circonférence, on obtient au moyen de la rotation un courant continu dans le fil.

Cet appareil n'était pas usuel ; M. Pixii fils (53), en 1832, est le premier artiste qui ait construit un appareil magnéto-électrique de quelque puissance, en disposant un électro-aimant fixe, et en imprimant un mouvement très-rapide à un aimant situé au-dessus, de façon que ses pôles pussent passer très-près des extrémités de la bobine ; un commutateur, placé sur l'axe de rotation, permettait de changer le sens du courant transmis, et par conséquent de lui donner toujours la même direction, puisque des courants alternativement inverses étaient développés par l'induction de l'aimant dans le fil de la bobine.

Cette machine, un peu volumineuse, a été bientôt remplacée par l'appareil plus portatif fait par Saxton, dans lequel, l'aimant étant fixe, la bobine était mobile autour d'un axe parallèle aux branches de la bobine et passant en son milieu. Cet appareil a été modifié et perfectionné par Clarke, et est employé maintenant dans les différentes expériences que l'on fait avec les courants dus à l'induction magnétique.

Dans ces dernières années, on a construit en France et en Angleterre de grands appareils, dans le but d'avoir une quantité d'électricité un peu forte, et de l'utiliser pour les besoins de l'industrie ; les principes sur lesquels ils sont fondés étant les mêmes que ceux sur lesquels sont disposés les précédents, nous n'en parlerons pas. Quant aux appareils d'induction destinés à des usages médicaux pour donner des commotions, etc., ils sont de petite dimension, et n'ont besoin que de produire des courants induits de courte durée et se succédant rapidement.

M. Page (54) a imaginé une disposition qui a été mise à profit par différents constructeurs, et qui consiste en ce que l'appareil, au lieu d'être construit comme celui de Clarke, a son aimant permanent fixe, ainsi que la bobine qui entoure les branches; la partie mobile est l'armature en fer doux de l'aimant qui, étant mise en mouvement devant les branches de ce dernier, fait varier la distribution du magnétisme, et donne lieu à des courants induits dans la bobine.

Les appareils électro-magnétiques sont en général plus énergiques que les appareils magnéto-électriques, car le fer recevant son aimantation d'un courant électrique, acquiert une plus grande puissance magnétique qu'un barreau d'acier aimanté d'une manière permanente. Dans ces appareils, il faut changer le sens du courant, ou du moins l'interrompre, et cette opération peut être faite à la main avec une manivelle, comme pour les appareils magnéto-électriques dont nous venons de parler, ou bien au moyen d'un mouvement imprimé par une machine, ou bien encore par le jeu de l'appareil lui-même. Si le mouvement mécanique transmis par une manivelle donne lieu au passage intermittent du courant, les effets d'induction sont aussi faciles à comprendre que ceux dont il a été question plus haut; mais si le rhéotome est un appareil automatique, on peut lui donner diverses dispositions. On en a adopté deux principales : la première, imaginée par M. Ritchie, et qui porte le nom de *tourniquet;* la seconde est le marteau ou trembleur : ce petit appareil paraît avoir été employé pour la première fois par M. Neef (55); M. Delarive l'a utilisé dans la construction de son condensateur électro-chimique (56), et on l'a employé depuis dans plusieurs appareils d'induction électro-magnétique.

L'appareil auquel M. Delarive a donné le nom de condensateur électro-chimique est en réalité un appareil électro-magnétique dont la bobine ne porte qu'un seul fil, et dans lequel circule d'une manière intermittente le courant d'un couple et les courants induits développés sous l'influence du barreau central en fer doux aimanté par intervalles au moyen du courant électrique du couple lui-même. Il est probable que l'augmentation d'effet observé quand on emploie cet appareil pour faire produire à un couple une action chimique déterminée, tient à ce que l'extra-courant direct permet au couple d'agir à certains moments comme le ferait un couple d'une force électro-motrice plus grande ou d'une résistance moindre; en effet, le travail chimique intérieur du couple dont l'action développe

un courant induit est augmenté par l'interposition dans la même proportion que l'effet chimique produit au dehors.

L'appareil d'induction électro-magnétique le plus remarquable et le plus énergique que l'on possède jusqu'ici est celui que l'on doit à M. Ruhmkorf, et qu'il a construit vers 1850 ou 1851 (57). Cet habile constructeur a employé une disposition analogue à celle du condensateur de M. Delarive, si ce n'est qu'il a fait usage de deux fils, l'un gros et court pour faire passer le courant inducteur, l'autre fin et très-long pour recevoir les courants induits. Il a utilisé aussi le trembleur, indiqué plus haut; de plus, il a mis à profit les recherches de MM. Masson et Breguet, et d'après lesquelles un long fil isolé peut donner des effets d'électricité statique. Seulement, en isolant parfaitement le fil, lui donnant une grande longueur, il a obtenu le premier des étincelles dans l'air, et il est parvenu aujourd'hui à des effets réellement puissants, puisqu'il peut avoir avec cet appareil, quand un courant électrique émané de quelques couples circule dans le gros fil inducteur, des étincelles dues au courant d'induction direct et qui ont jusqu'à 12 centimètres de longueur.

Cet appareil d'induction n'a pas été construit de prime-abord par M. Ruhmkorf avec toute cette puissance; il l'a perfectionné peu à peu en mettant à profit les recherches que les physiciens se sont hâtés de faire avec ce précieux instrument, recherches qui ont tourné au profit de la science, en montrant des conditions relatives au développement des courants induits, qui avaient échappé jusqu'ici à leurs observations.

Parmi les faits observés, on peut citer ce résultat que, bien qu'il se produise dans le fil fin de l'appareil une succession de courants induits inverses et directs, cependant le courant direct seul manifeste ces effets de tension énergiques donnant lieu aux étincelles; ce résultat tient sans doute à ce que l'aimant central, et par suite le courant induit inverse, est influencé par l'extra-courant également inverse qui circule dans le gros fil lors de la fermeture du circuit, tandis qu'il n'en est plus de même pour le courant direct, puisque l'extra-courant direct ne peut circuler dans le gros fil quand on rompt le circuit formé par celui-ci et par la pile. C'est même pour ce motif qu'en faisant communiquer les deux extrémités du gros fil inducteur avec les deux faces d'un condensateur, ainsi que l'a proposé M. Fizeau (58), on diminue l'extra-courant direct qui charge le condensateur, et on augmente d'autant le cou-

rant induit direct dont l'action dans l'appareil d'induction est prédominante.

Quand on se sert de l'appareil d'induction pour transmettre les décharges dans un œuf électrique renfermant diverses vapeurs, on observe une stratification particulière de l'auréole lumineuse, qui a été remarquée par M. Ruhmkorf. MM. Quet, Grove et plusieurs physiciens ont étudié cet effet, qui, d'après M. Van-der-Willigen (59), semble n'être dû qu'au retard éprouvé par la décharge induite lorsqu'elle s'effectue, puisque ce dernier a pu reproduire ces apparences avec une machine électrique ordinaire, en faisant communiquer les conducteurs de celle-ci avec l'œuf électrique, au moyen d'une corde mouillée qui augmente la durée de la décharge.

On doit ajouter que l'appareil remarquable dont nous venons de parler a permis d'utiliser mieux qu'on ne l'avait fait jusque-là les effets des courants induits pour l'inflammation de la poudre dans les mines, et dans toutes les circonstances où il est nécessaire de développer à distance et presque instantanément une étincelle capable de produire des effets calorifiques énergiques ; c'est en raison de l'importance de cet appareil que nous avons cru devoir en parler avec quelques détails.

Dans cette période de l'histoire de l'électricité, Oersted, Ampère, Arago et Faraday occupent le premier rang : Oersted pour avoir découvert le principe fondamental de l'électro-magnétisme ; Ampère, la loi des phénomènes qui s'en déduisent, et que l'on considère avec raison comme le fondateur de cette partie de la physique ; Arago, le magnétisme par rotation ; Faraday, les causes et les propriétés des courants induits. Viennent ensuite les physiciens que nous avons cités, et qui, par leurs travaux, ont concouru au développement de cette branche de l'électricité dont les applications aux arts promettent d'être immenses.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE IV.

(1) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XIV, p. 417. — *Bibliothèque universelle de Genève*, t. XIV, p. 274, et t. XV, p. 137.

(2) *Annales de chimie et de physique*, t. XV, p. 59 et 170.

(3) *Annales de chimie et de physique*, t. XV, p. 93.

(4) *Journal de physique*, t. XCI, p. 394.

(5) *Idem.* t. XCI, p. 151.

(6) *Journal de physique*, t. XCI, p. 151. — *Annales de chimie et de physique* t. XV, p. 222.

(7) *Journal de physique*, t. XCI, p. 226. — *Annales de chimie et de physique*, t. XV, p. 170.

(8) *On electro-magnetick notions, and the theory of magnetism.* — *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XVIII, p. 337.

(9) *Précis des phénomènes électro-dynamiques* (5e volume de la *Chimie* de Thomson).

(10) *Annales de chimie et de physique*, t. XXII, p. 389.

(10[1]) De Montferrand, *Manuel d'électricité dynamique*, p. 153.

(11) *Bibliothèque universelle de Genève*, t. XVI, p. 197. — *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXII, p. 358.

(11[1]) De Montferrand, *Manuel d'électricité dynamique*, p. 99.

(12) Delarive, *Esquisse historique sur les principales découvertes faites en électricité*, p. 63 (1833).

(13) *Annales de physique et de chimie*, t. XXII, p. 91 et XXIII, p. 413.

(14) Ampère, *Recueil d'observations électro-dynamiques*, p. 215.

(14[1]) De Montferrand, *Manuel d'électricité dynamique*, p. 189.

(15) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXIV, p. 25 (1827).

(16) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. L, p. 331 (1832).

(17) *Même volume et* t. LVI, p. 222.

(18) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. I, p. 385.

(19) *Annales de Poggendorf*, t. XLVII.

(20) *Idem*, t. LXXIX (1850), p. 337 et t. LXXXII, p. 181. — *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVIII, p. 119.

(21) *Bibliothèque universelle de Genève*, t. XVI, p. 197.

(22) *Idem*, t. XXIX, p. 119, t. XXVII., p. 10. — *Annales de chimie et de physique*, t. XLIII, p. 146.

(23) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXII, p. 420 (1825).

(24) *Mémoires de la Société de physique de Genève*, t. III, 1re partie, p. 117 (1824).

(24[1]) *Idem*, t. XXVI, p. 325.

(25) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. IV, p. 267 — Pouillet, *Traité de physique et de météorologie*.

(25[1]) *Ann. de chim. et de phys.*, t. XXXII, p. 219.

(26) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXV, p. 449.

(27) *Annales de physique de Poggendorf*, t. LVII. — *Annales de physique et de chimie*, 3e série, t. VIII, p. 115.

(28) *Annales de Poggendorf*, t. LV.

(29) *Idem*, t. LIX.

(30) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences de l'Institut*, t. XXXVI, p. 191.

(31) *Annales de Poggendorf*, t. LIX.

(32) *Annales de chimie et de physique*, t. LXVI, p. 184. — Becquerel et E. Becquerel, *Traité d'électricité et de magnétisme*, t. I, p. 72.

(33) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXV, p. 269 et t. XXXVI, p. 337. — Becquerel, *Traité d'électricité* en 7 vol., t. II, p. 382.

(34) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVII, p. 363. — Becquerel, *Traité d'électr.*, t. II, p. 393.

(34[1]) *Idem*, t. XXVIII, p. 325.

(35) *Bibliothèque universelle de Genève*, janvier 1826.
(35[1]) *Annales de chimie et de physique*, 2[e] série, t. XXXII, p. 213.
(36) *Trans. philos.*, 1825.
(37) *Idem*, p. 347 et 497, et 1827, p. 71.
(38) *Annales de chimie et de physique*, t. XXXIX, p. 232 ; t. XLII, p. 33 ; t. LII, p. 303.
(38[1]) Becquerel, *Traité d'élect.* en 7 vol., t. II, p. 407.
(39) *Idem*, t. XLVIII, p. 412 ; t. L, p. 280.
(39[1]) *Idem*, 3[e] série, t. XLIV, p. 172.
(40) Matteucci, *Cours spécial sur l'induction*, Paris, 1854. — *Annales de chimie et de physique*, 3[e] série, t. XLIX, p. 129.
(40[1]) *Bibl. univ. de Genève*, sept. 1822. — Ampère, *Recueil d'observ. électro-dyn.*, p. 285.
(40[2]) *Mémoire présenté à l'Académie des sciences le 4 septembre* 1822. — Ampère, *Recueil d'observ. électro-dyn.*, p. 321.
(41) *Transact. philos.* de 1832 et de 1833. — *Bibliothèque universelle*, t. XLIX, p. 341 ; t. LIX, p. 128. — *Annales de physique et de chimie*, t. L, p. 5 et 113; t. LI, p. 404.
(41[1]) *Biblioth. univ.*, t. II, p. 128 (1835).
(42) *Archives de l'électricité*, t. II, p. 350; t. III, p. 484. — *Annales de chimie et de physique*, nouv. série, t. III, p. 394.
(43) *Annales de chimie et de physique*, nouv. série, t. III, p. 172; t. VII, p. 462.
(44) *Idem*, t. XXIV, p. 377.
(45) *Annales de chimie et de physique*, 2[e] série, t. LXVI. p. 5. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XLIII, p. 1115.
(46) *Annales de chimie et de physique*, nouv. série, t. X, p. 491; t. II, p. 385.
(47) *Idem*, t. IV, p. 153. — *Archives de l'électricité*, t. V, p. 530.
(48) *Annales de chimie et de physique*, 2[e] série, t. LXXIV, p. 158 (1840).
(49) *Archives de l'électricité*, t. III, p. 341 ; t. IV, p. 172; t. V, p. 181. — *Annales de chimie et de physique*, 3[e] série, t. VIII, p. 563.
(50) *Annales der phys. and chem.*, t. XLIX, p. 72 — *Archives de l'électricité*, t. II, p. 290.
(51) *Annales de chimie et de physique*, 3[e] série, t. IV, p. 129.
(51[1]) *Annales de Poggend.*, t. XXXI.
(52) *Annales de chimie et de physique*, nouv. série, t. XXII, p. 19.
(52[1]) *Annales de chimie et de physique*, 3[e] série, t. XXXIV, p. 504.
(52[2]) *Idem*, t. XLV, p. 316.
(53) *Annales de chimie et de physique*, 2[e] série, p. 76 (1832).
(54) *Annals of electricity, magnet. and chymistry*, 1839, p. 489.
(55) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. VIII, p. 406 (1839).
(56) *Idem*, t. XVI, p. 772.
(57) *Description de l'appareil de Ruhmkorf*, par M. Du Moncel. — Becquerel et E. Becquerel, *Traité d'électricité*, t. III, p. 238
(58) *Comptes rendus*, t. XXXVI, p. 418.
(59) *Annales de chimie et de physique*, 3[e] série, t. L, p. 126.

CHAPITRE V.

Magnétisme depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle.

I. *Distribution du magnétisme dans les aimants. — Influence de l'état moléculaire et de la chaleur sur l'aimantation.*

Coulomb, dont nous avons résumé les travaux dans le chapitre III, a comparé ensemble les effets produits dans la réunion d'aiguilles aimantées juxtaposées, afin de chercher à découvrir la distribution du magnétisme dans l'intérieur des aimants; les résultats intéressants auxquels il est parvenu montrent combien est compliquée cette distribution, en raison des actions par influence: il s'est borné à fournir des indications précieuses (1) sur les meilleures formes à donner aux aiguilles aimantées qui doivent servir à construire des boussoles. Il a aussi montré qu'une lame, pour donner les meilleurs effets, devait être peu épaisse, large, et taillée en flèche, l'action produite par un aimant étant plus énergique que lorsqu'elle est taillée en parallélogramme rectangle : Musschenbroek était parvenu par l'expérience au même résultat.

Nous devons maintenant citer les recherches de M. Nobili sur l'aimantation; plusieurs des résultats qu'il a obtenus sont en opposition avec ceux qui ont été annoncés par Coulomb. Nobili (2) a cherché à démontrer que l'on ne devait pas considérer un cylindre aimanté comme formé d'un faisceau d'aiguilles très-fines de même longueur, toutes aimantées dans le même sens, attendu que ce faisceau finissait par se désaimanter presque entièrement. En suivant le même mode d'expérimentation que Coulomb, il a trouvé, comme lui, que les aiguilles ne restent pas toutes aimantées au même

degré ; que les plus fortes désaimantent d'abord les plus faibles, qui prennent ensuite un magnétisme contraire.

En étudiant la distribution du magnétisme dans les barreaux disposés en échelons, Nobili a reconnu que le barreau du centre non-seulement conserve son magnétisme, mais acquiert encore un plus grand degré de force que par tout autre arrangement. Il admet que l'intérieur du barreau est divisé en couches concentriques, dont le magnétisme va en diminuant rapidement du dehors au dedans.

La trempe et le recuit ont une très-grande influence sur le degré d'aimantation des barreaux ; Coulomb, qui a également traité cette question, a reconnu que les aiguilles trempées, fortement recuites jusqu'au rouge sombre, prenaient un plus fort degré d'aimantation que lorsque le recuit avait lieu à une température plus élevée ou plus basse. Nobili, en opérant sur des barreaux creux, a obtenu des résultats plus énergiques qu'avec des barreaux pleins, à poids égal, en raison de la plus grande uniformité de trempe dans les premiers que dans ceux-ci. C'est par cette raison que, dans certains appareils, il est préférable d'employer des barreaux creux, au lieu de barreaux pleins.

Lorsqu'on soumet le fer ou l'acier au martelage, ou qu'on lui fait subir la torsion, ses propriétés physiques sont changées tout aussi bien que par la trempe; il peut même acquérir une force coercitive appréciable, et devenir un aimant permanent : le fait connu déjà du temps de Gilbert, et rapporté page 60, montre que le martelage peut donner lieu à cet effet.

M. E. Becquerel (3), dans un premier mémoire sur le magnétisme, a montré quelle est l'influence d'une torsion passagère sur le fer doux : ayant placé un fil de fer recuit dans la position verticale, ce fil, soumis à l'action de la terre, s'est aimanté par influence, et a acquis un pôle boréal en haut, et un pôle austral en bas : dans cette position, le fil, ayant été tordu, est devenu aimant permanent ; mais en ne dépassant pas sa limite d'élasticité, et le détordant, l'effet a disparu, et s'est reproduit quand on l'a tordu en sens inverse. Ces résultats étaient rendus appréciables à l'aide des courants induits, développés par l'influence de l'aimantation du fil, dans une hélice qui enveloppait ce dernier, et qui était placée à une certaine distance : en suspendant le fil avec un poids, et produisant des oscillations par torsion, on a pu obtenir à chaque oscillation des effets qu'on a pu apprécier à l'aide du courant électrique accusé par un multiplicateur.

M. Wertheim (4) a étudié les effets de la torsion en plaçant les fils ou les barres de fer soumis à cette action au milieu d'une double hélice, l'une servant à faire passer un courant électrique qui aimante le fer par influence, et l'autre, à accuser un courant par induction, produit dans des circonstances analogues à celles qui se sont manifestées plus haut; il a obtenu des résultats du même genre, mais en distinguant les effets de torsion permanente des effets de torsion temporaire ou de torsion élastique. M. Wertheim a cru pouvoir déduire de ses expériences que la torsion agit d'une manière toute spéciale en forçant les molécules de fer à se disposer en spirales, et en donnant à la matière la même forme qu'Ampère a assignée au courant électrique.

M. Matteucci (5), qui a également étudié ces phénomènes, n'a pas été conduit à toutes ces mêmes conclusions. Il a bien fait voir que la torsion diminue l'état magnétique, et que la détorsion l'augmente; mais il n'a pu vérifier le fait observé par M. Wertheim, que l'action varie suivant que la torsion temporaire ou élastique agit dans le même sens ou en sens inverse de la torsion permanente. M. Matteucci a examiné l'influence de la traction sur les fils de fer, et il a trouvé que cette traction donne lieu, comme la détorsion, à une augmentation dans l'intensité magnétique qui peut être développée par influence dans le fil.

Coulomb est le premier qui se soit occupé de l'influence de la chaleur sur le magnétisme des aiguilles aimantées; ce sujet mérite d'autant plus d'attirer l'attention, que les voyageurs, en parcourant les diverses parties du globe, font leurs observations dans des localités qui présentent des différences de température comprises entre — 40 et + 50° : les aiguilles aimantées dont ils font usage doivent donc éprouver dans leur magnétisme des changements qui empêchent que les résultats ne soient comparables.

Coulomb s'était borné à déterminer la résultante des effets produits par la chaleur sur le magnétisme libre des aiguilles ou des barreaux aimantés. M. Kuppfer (6) a envisagé la question sous le point de vue pratique; il a déterminé la quantité de magnétisme libre en différents points d'un barreau quand on fait varier la température en employant, comme Coulomb, la méthode des oscillations : il a obtenu une formule dont on se sert aujourd'hui pour ramener toutes les observations à une même température.

Le capitaine Duperrey, qui a fait usage de la loi indiquée par M. Kuppfer, pense que l'on doit observer à deux températures diffé-

rentes dans chaque station, attendu que le coefficient d'une même aiguille n'est pas constant, la chaleur agissant aussi bien sur le magnétisme terrestre que sur celui de l'aiguille.

Gauss, aidé de MM. Weber et Goldsmith (7), a donné aussi un moyen de corriger les effets dus aux différences de température, lesquelles sont plus marquées avec les barreaux des magnétomètres qu'avec les aiguilles de boussoles. Ces physiciens ont considéré le procédé de Kuppfer comme peu applicable aux barreaux aimantés, en raison de la difficulté de modifier à volonté et de mesurer exactement leur température quand ils oscillent. On ne peut compter effectivement sur des valeurs certaines, qu'autant que la température et l'intensité magnétique du barreau sont stationnaires, conditions bien difficiles à remplir quand ce barreau a de grandes dimensions. Le magnétomètre n'a pas cet inconvénient, comme le démontre le résultat de leurs expériences : ils ont trouvé qu'il vaut mieux se servir, pour le magnétomètre bifilaire, de barreaux très-fortement aimantés, afin de déterminer les influences de la température.

§ II. *Métaux magnétiques proprement dits. — Fer, nickel et cobalt.*

Il résulte des faits que nous avons rapportés dans le chapitre III que, jusqu'en 1820, on avait été conduit à étudier les différents procédés d'aimantation de l'acier et du fer, et la distribution du magnétisme dans les barreaux de différentes formes. On a cherché depuis à évaluer d'une manière comparative les effets résultant de l'influence d'un aimant placé à distance sur des barreaux semblables d'acier, de fer ou de fonte ; M. Barlow (7'), entre autres, a donné une série de résultats d'après lesquels la fonte peut avoir une action au moins moitié de celle de l'acier ou du fer doux.

M. Edmond Becquerel (8) s'est proposé de déterminer ces actions comparatives, en supposant que les substances influencées aient même forme et soient situées à la même distance des aimants ; il a donné le nom de *magnetisme spécifique* aux effets produits. Il a trouvé d'abord que l'action exercée sur le fer doux est la même, que le fer soit à l'état de poudre impalpable ou qu'il soit malléable, mais pur et sans être écroui. En faisant des mélanges de fer divisé et de poudres inertes, il a vu que le magnétisme spécifique, à volume égal, est proportionel au carré de la densité magnétique, quand les particules sont très-rapprochées, et simplement à la den-

sité magnétique quand elles sont très-éloignées; entre ces deux limites la loi serait fort compliquée. Quand le fer est carburé ou écroui, alors le magnétisme spécifique diminue, et la matière acquiert une force coercitive plus ou moins forte.

Le nickel et le cobalt sont fortement magnétiques, et M. E. Becquerel a démontré que, lorsqu'ils sont à l'état de pureté, leur magnétisme spécifique est sensiblement le même que celui du fer doux, à la température ordinaire; si ces métaux sont alliés, et surtout le cobalt avec l'arsenic, ils peuvent perdre presque complétement la faculté d'être attirables à l'aimant.

L'action de la chaleur sur le fer et ses carbures a été observée depuis longtemps, puisque, du temps même de Gilbert (voir page 61), on avait reconnu que le fer rouge n'agissait plus sur l'aiguille aimantée. M. Barlow (9), qui a comparé les effets produits avec différents barreaux de fer, d'acier et de fonte, sur une aiguille aimantée, a reconnu que l'action de la fonte de fer augmente à mesure qu'on élève la température; qu'au rouge sombre elle est à son maximum, et qu'au rouge brillant elle est nulle. Il a vu qu'en élevant d'abord les barreaux de fer et de fonte à la température rouge-blanc, et les laissant refroidir, en arrivant au point où le fer devient magnétique, l'attraction qui se manifeste atteint quelquefois immédiatement son maximum, d'autres fois elle augmente graduellement.

M. E. Becquerel, dans le travail cité plus haut, a comparé les effets produits par des aimants sur des petits barreaux de diverses matières portées à des températures différentes; voici les principales conséquences auxquelles il a été conduit :

1° En élevant la température au rouge naissant, toute trace de force coercitive disparaît dans le fer doux, la fonte et l'acier; au rouge-cerise, ces substances perdent la faculté d'être attirées par l'aimant, du moins si l'on n'a égard qu'aux actions énergiques, car il subsiste une légère action analogue à celles dont il sera question dans le paragraphe suivant.

2° Le magnétisme spécifique du fer doux ne varie que très-peu entre la température ordinaire et celle du rouge sombre; seulement au rouge sombre il augmente de $\frac{4}{100}$ à peu près.

3° Le magnétisme spécifique de la fonte de fer augmente avec la température, en sorte qu'au rouge naissant il est à son maximum. Dans la fonte et l'acier, le magnétisme spécifique, qui est plus faible que celui du fer à la température ordinaire, augmente

à mesure que celle-ci s'élève, de telle sorte qu'avant de s'anéantir en partie il est au moins égal à celui du fer doux.

4° Le nickel et ses carbures se comportent comme le fer et ses carbures; seulement la température à laquelle le nickel cesse d'être fortement magnétique est beaucoup plus basse (400° environ).

5° Quant au cobalt (cobalt carburé et fondu), il se comporte de même que la fonte de fer et celle du nickel, et vers le rouge-cerise son magnétisme est le même que celui du fer et du nickel. La température à laquelle il perd son magnétisme est beaucoup plus élevée que pour les deux autres métaux magnétiques, car on ne peut l'atteindre qu'au blanc éblouissant du feu de forge.

D'après le mode d'action de la chaleur sur les métaux magnétiques, il était tout naturel de supposer qu'en abaissant convenablement la température de certains métaux qui n'ont pas ces propriétés à la température ordinaire, on parviendrait à la leur donner. Les expériences tentées par plusieurs physiciens n'ont pu confirmer cette conjecture, et le manganèse ni le chrome, à une température même de 80° au-dessous de zéro, n'ont présenté d'effets comparables à ceux des trois métaux magnétiques; néanmoins ces substances exercent une action sur une aiguille aimantée comme beaucoup d'autres corps, ainsi qu'on va le voir.

§ III. *Actions exercées sur tous les corps.*

Dans le chapitre IIIe, page 68, nous avons rapporté les expériences faites par différents physiciens pour montrer que d'autres corps que les composés de fer, de nickel ou de cobalt, pouvaient être influencés par les aimants. On a vu que Brugman avait signalé le fait de la répulsion exercée de la part d'un aimant sur le bismuth, ou de la part de ce métal sur une aiguille aimantée : ce sujet, à cette époque, avait à peine attiré l'attention; mais depuis lors, et surtout depuis une dizaine d'années, il a été l'objet de recherches suivies, et a conduit à des découvertes importantes.

M. Becquerel (10), en 1824, a examiné l'action des aimants et des courants très-énergiques sur différents corps. Il a reconnu que des substances telles que le bois, la gomme-laque, sont influencées par les aimants ou les courants : dans ces corps, la distribution du magnétisme ne se fait pas constamment de la même manière, et les aiguilles ne se mettent pas toujours dans la direction de la ligne des pôles. Il se fait une distribution transversale du

magnétisme, et la petite aiguille se place perpendiculairement à la ligne des pôles. En variant la distance de cette aiguille aux pôles des aimants, on peut même la faire passer par toutes les positions intermédiaires entre la ligne des pôles et la position perpendiculaire. Ces effets se produisent lorsque la longueur des aiguilles surpasse plusieurs millimètres, et n'ont jamais lieu avec des substances fortement magnétiques, comme le fer et le nickel. Il est probable que ces différents effets tiennent à ce que, le magnétisme étant très-faible dans les premiers corps, on peut négliger la réaction du corps sur lui-même; dès lors l'action directe du barreau aimanté doit l'emporter, et toutes les particules qui le composent tendent à se mettre dans le même état relatif par rapport à lui.

Lorsqu'il a été question du magnétisme par rotation, nous avons dit, page 82, qu'Arago avait observé que des substances telles que verre, le soufre, avaient une action sur l'aiguille aimantée; mais, ces matières ne conduisant pas l'électricité, les effets d'induction seuls ne peuvent expliquer l'action produite, et l'effet magnétique dû à l'action particulière de ces corps peut avoir une influence.

Lebaillif (11) a aussi examiné l'influence des corps sur les aimants; mais, au lieu de soumettre les substances à l'action des aimants, il a suspendu une aiguille aimantée de façon qu'elle fût très-sensible à l'action des corps magnétiques, et il en a approché les substances qu'il voulait soumettre à l'expérience, afin d'observer la déviation de l'aiguille. Il a vu, comme Brugman, que le bismuth produit une répulsion, quels que soient le côté par lequel on présente ce métal à l'aiguille, et le pôle de celle-ci.

Depuis cette époque, M. Dove (12) a cherché à étudier l'action magnétique exercée sur différents métaux, à l'aide des phénomènes d'induction; mais, les résultats obtenus pouvant être compliqués d'effets de courants induits, on ne peut en tirer aucune conclusion touchant le sujet qui nous occupe.

Les effets d'attraction et de répulsion avaient attiré également l'attention de physiciens, parmi lesquels nous citerons notamment M. Saigey et M. de Haldat; mais, en 1845, M. Faraday, ayant découvert l'action exercée par les aimants sur les substances transparentes pour modifier leurs propriétés optiques, étudia (13) l'action que les aimants exercent pour attirer et repousser les corps, et surtout les effets de répulsions observés par Brugman et Lebaillif. Il reconnut, à l'aide d'un puissant électro-aimant, que non-seulement le bismuth et d'autres métaux, mais encore les substances telles que le phos-

phore, le soufre, et les liquides, comme l'eau, l'alcool et l'éther, sont repoussés par les pôles d'un aimant; si une aiguille aimantée a une sensibilité suffisante, elle est également repoussée par tous les points de ces substances.

M. Faraday a pensé qu'il fallait admettre dans la matière une nouvelle propriété, mais inverse de celle que possède le fer, et que l'on devait diviser les corps en corps *magnétiques* ou attirables à l'aimant, et corps *diamagnétiques* ou repoussés par l'aimant: parmi les premiers, indépendamment du fer, du nickel et du cobalt, peuvent se placer, mais à un degré plus faible, le platine, le titane, le palladium, le chrome, le manganèse, etc.; parmi les seconds, toutes les autres substances, et au plus haut degré le bismuth.

M. Plucker (14) s'occupa alors de la détermination numérique des pouvoirs magnétiques des corps solides et liquides; mais la méthode dont il a fait usage, et qui consiste à mesurer l'effet produit au contact des corps ou d'une capsule qui les renferme avec un électro-aimant, n'est pas à l'abri d'objections : on doit donc élever des doutes sur l'exactitude de ses déterminations.

M. Edmond Becquerel (15), en 1849, à peu près à la même époque, a publié sur ce sujet un premier travail, dans lequel il donna un procédé d'expérimentation susceptible d'une très-grande précision pour mesurer les effets d'attraction et de répulsion exercés sur tous les corps solides, liquides ou gazeux, et pour comparer leur *magnétisme spécifique* à des intensités magnétiques différentes.

Dans ce travail, ainsi que dans deux autres qui suivirent (16), il montra d'abord que la répulsion exercée sur les substances repoussées, ainsi que l'attraction produite sur le fer doux, varie comme le carré de l'intensité magnétique de l'aimant actif. La découverte de cette loi est importante, car elle montre que la matière soumise à l'influence de l'aimant ne joue pas un rôle purement passif dans l'action qui se manifeste.

Il a observé que les matières repoussées, comme le bismuth, le soufre, le plomb, ne conservent pas trace de polarité après l'action magnétique. Mais certaines substances attirables par l'aimant, telles que le platine et plusieurs composés ferrugineux, donnent des effets différents. Il a trouvé alors que le rapport de la force d'attraction au carré de l'intensité de l'aimant change avec cette intensité, mais que ce rapport tend vers une limite constante, à mesure que l'intensité augmente; ces corps se comportent comme ayant une force

coercitive sensible, et sont attirés à la manière de l'acier et de la fonte.

Il a reconnu également que plusieurs composés, tels que le charbon, le verre, peuvent être attirés lorsque l'électro-aimant a une faible intensité magnétique, et repoussés quand il est plus énergique; mais, si l'on examine avec attention ces composés après que l'aimantation a cessé, on trouve qu'ils ont acquis la propriété polaire : on peut se convaincre par là qu'ils se comportent comme doués d'une force coercitive assez grande. On doit considérer ces matières comme des mélanges de substances attirées et de substances repoussées par les aimants, et la loi d'attraction est fort compliquée. En plaçant les substances à différentes distances d'un centre magnétique, on a les mêmes effets qu'en faisant varier l'intensité d'aimantation.

Ces recherches ont donc montré que l'on ne pouvait pas représenter le magnétisme spécifique de chaque corps par une quantité constante, et que cette quantité peut dépendre de l'intensité magnétique, ou bien, à intensité magnétique égale, qu'elle peut être fonction de la distance au centre d'action. Ces résultats expliquent également plusieurs effets qui avaient été observés par M. Plucker et par Œrsted (17) dans la comparaison des actions exercées sur différents corps par les aimants.

M. E. Becquerel, dans le même travail, s'est occupé de l'action exercée sur les liquides et sur les corps solides lorsqu'ils sont plongés dans différents liquides. Il a prouvé que l'action du magnétisme sur un corps, plongé au milieu d'un liquide ou d'un gaz, est la différence des actions exercées sur ce corps et sur la masse du milieu ambiant déplacé; dès lors, ce corps est attiré ou repoussé par l'aimant, suivant que l'action exercée sur lui est moins forte ou plus forte que l'action produite sur le milieu déplacé, de même qu'un ballon plein de gaz tombe à la surface de la terre, ou s'élève dans l'air, suivant que le gaz est plus dense ou moins dense que l'air. Ce principe est donc analogue au principe d'Archimède pour la pesanteur.

Depuis la publication de ce travail, M. Faraday (18) s'est occupé de nouveau de ce sujet, et a mesuré les actions exercées sur les corps par les aimants, à l'aide d'une méthode analogue à celle dont M. E. Becquerel avait fait usage.

L'action magnétique exercée par les liquides explique différents effets observés, qui sont dus aux attractions et répulsions exercées de la part des pôles des aimants : c'est ainsi que la surface extérieure

d'une dissolution magnétique, placée dans un verre de montre mis sur le pôle d'un très-fort électro-aimant, ne reste pas horizontale, et prend une forme dépendante de la nature de l'action exercée ; suivant M. Plucker, la surface se creuse si on emploie un liquide magnétique ; elle se soulève au milieu, si c'est un liquide diamagnétique. M. Matteucci (19) a vu également qu'un liquide placé entre les pôles d'un électro-aimant dans une cuve rectangulaire de 8 à 9 millimètres de largeur, et le plus près possible de l'axe magnétique, se transporte vers la ligne des pôles, où il reste soulevé de plusieurs millimètres, si c'est un liquide magnétique, en donnant à la surface une courbure facile à déterminer ; si c'est un liquide diamagnétique, on trouve au contraire une dépression. Nous devons citer encore le fait annoncé par M. Quet (19') que l'élévation des liquides dans les tubes capillaires est tout autre en présence des électro-aimants que dans des conditions ordinaires.

Les gaz, comme les solides et les liquides, sont influencés par les aimants ; la première expérience faite dans cette direction date de 1846 : M. Bancalari trouva que la flamme d'une lampe est repoussée par les pôles d'un aimant. M. Zantédeschi, en répétant cette expérience, montra que chacun des deux pôles repousse la flamme, et que cet effet est accompagné d'une dépression dans cette flamme.

M. Faraday (20) étudia ensuite l'action d'un électro-aimant sur des courants gazeux mélangés de fumée, qu'il faisait monter ou descendre près des pôles ; il observa des effets différents, suivant la température et la nature des courants gazeux, mais indiquant seulement si un gaz avait une action plus ou moins énergique que l'air environnant, sans rien décider si ce gaz était magnétique ou diamagnétique par lui-même.

Ce n'est qu'en 1849 (21), en mesurant par la torsion les attractions des diverses substances plongées successivement dans le vide et dans différents gaz, et en partant de ce principe démontré plus haut, que l'effet produit est la différence des actions exercées sur un corps et sur le milieu déplacé, que M. E. Becquerel put déterminer l'action produite par un aimant sur une masse gazeuse. Ce sont les expériences faites à l'aide de cette méthode qui l'ont conduit à la découverte du magnétisme de l'oxygène.

Il a trouvé par expérience que, dans l'air, un petit tube de verre est moins attiré par les aimants que dans le vide ; de petits barreaux de soufre, de cire, sont, au contraire, repoussés plus énergi-

quement que lorsqu'ils sont environnés de ce gaz; ainsi l'air se comporte comme un milieu magnétique. L'hydrogène, l'azote, l'acide carbonique, soumis au même mode d'investigation, ne donnent un effet appréciable que lorsqu'on peut les condenser à l'aide de substances absorbantes; ils se conduisent alors comme repoussés par les aimants. L'oxygène, au contraire, manifeste les mêmes propriétés que l'air, et cela avec une intensité cinq fois plus considérable, ce qui prouve que c'est sa présence qui donne à l'air sa puissance magnétique.

M. E. Becquerel a pu également démontrer la puissance magnétique de l'oxygène en se servant de petits cylindres de charbon bien recuit, cette substance pouvant condenser un certain nombre de fois son volume de gaz : dans l'oxygène, un cylindre de charbon est attiré par les pôles magnétiques d'un électro-aimant, et oscille entre eux comme une petite aiguille aimantée; mais vient-on à faire le vide autour de lui, alors cet effet cesse, et le petit cylindre est en général repoussé, mais est toujours moins attiré que lorsqu'il renferme de l'oxygène. Cette expérience curieuse réussit également bien dans l'air, mais avec une intensité moindre que dans l'oxygène.

Deux autres gaz partagent avec l'oxygène la propriété d'être attirables aux aimants; ce sont : le deutoxyde d'azote et l'acide azoteux; les autres gaz tels que le chlore, l'ammoniaque, l'acide carbonique, le gaz oléfiant, etc., sont repoussés par les aimants.

D'après M. E. Becquerel, la puissance magnétique de l'oxygène est telle que 1 mètre cube de ce gaz, pris à 76 centimètres de pression, et supposé condensé de manière à avoir la même densité que le fer, agirait sur une aiguille aimantée comme un petit cube de fer du poids de $5^{\text{decig.}}$,6. Un mètre cube d'air, d'après cela, a une action représentée par 11 centigrammes de fer, l'azote n'ayant qu'une action à peine appréciable. Si l'on réfléchit que la terre est environnée d'une masse d'air équivalente au poids d'une couche de mercure de 76 centimètres d'épaisseur, et qui couvre tout le globe, il est aisé de comprendre qu'une pareille masse, soumise à des variations continuelles de température et de pression, doit intervenir dans quelques-uns des phénomènes dépendant du magnétisme terrestre. En effet, l'influence de cette couche d'air serait équivalente à une immense lame de fer, d'une épaisseur d'un peu plus de $\frac{1}{10}$ de millimètre, et qui couvrirait toute la terre.

Depuis cette époque, l'action du magnétisme sur tous les corps n'a pas cessé d'occuper les physiciens, M. Faraday (22) est revenu

à différentes reprises sur ces questions : MM. Plucker (23), Reich, Poggendorf (24), Tyndall, Matteucci, Weber, ont comparé les actions exercées par les substances dans différentes conditions de température et d'intensité magnétique. On a trouvé, entre autres, que l'élévation de température diminue en général l'action magnétique, comme la répulsion exercée sur les corps. M. Tyndall et Reich ont vérifié l'exactitude de la loi trouvée par M. E. Becquerel (voir page 105), et qui est relative à la variation du pouvoir de répulsion exercé sur les différents corps. Enfin on a observé que l'état moléculaire de chaque combinaison influait seule sur l'action attractive ou répulsive que présente chaque substance en présence d'un aimant; en effet, des combinaisons de métaux non magnétiques comme le cuivre, peuvent être attirables à l'aimant (exemple, chlorure de cuivre) et des combinaisons de fer peuvent être repoussées (exemple, cyanure jaune de fer).

Les substances cristallisées, de même que les solides, les liquides et les gaz, obéissent à l'action du magnétisme : M. Plucker (25) a observé que des corps cristallisés, suspendus entre les pôles d'un aimant puissant, ne se placent pas indifféremment dans la ligne axiale ou perpendiculairement à cette ligne. Ce physicien avait cru pouvoir déduire de ses recherches qu'il y avait une relation entre la position de l'axe optique des cristaux et celle de la ligne des pôles de l'aimant, suivant la direction de cet axe optique par rapport à la réfrangibilité de la matière. Ce sujet ayant été étudié par M. Faraday (26), et surtout par MM. Tyndall et Knoblauch (27), ces derniers ont prouvé que la composition chimique du cristal, comme la forme cristalline, exerce une influence, et qu'il n'y a aucune loi générale qui règle la position de ce cristal entre les pôles d'un aimant. Ils ont même imité artificiellement les effets des cristaux en comprimant des pâtes faites avec des poudres de diverses matières, et formant de petits barreaux dans lesquels l'intensité magnétique varie suivant les directions de la compression. Ainsi l'on peut considérer les effets que présentent les substances cristallisées comme rentrant dans les effets généraux observés avec les corps amorphes, mais modifiés par le groupement particulier, ou la compression des molécules.

On a vu que M. Faraday avait proposé de nommer substances diamagnétiques les corps repoussés par les aimants, et substances magnétiques celles qui sont attirées. Ces dénominations sembleraient indiquer deux genres d'action exercées par les aimants. M. E. Bec-

querel, en publiant son premier travail en 1849, a montré qu'il était possible de lier entre eux les différents phénomènes, sans qu'il soit besoin d'admettre deux genres d'actions différentes ; en remarquant qu'une substance plongée dans un milieu est attirée par un centre magnétique avec la différence des actions exercées sur cette substance et sur le milieu déplacé, il a émis l'hypothèse que, le milieu éthéré qui environne les corps étant plus ou moins influencé que la partie qui les pénètre, la différence des actions exercées sur le corps lui-même et sur le milieu déplacé, suivant que ce dernier se comporte comme plus magnétique ou moins magnétique que le corps, doit donner lieu à une répulsion ou à une attraction ; alors, d'après cette hypothèse, le magnétisme agit de la même manière sur tous les corps, mais à un degré plus ou moins fort, et, suivant l'action du milieu éthéré déplacé, il se manifeste une attraction ou une répulsion. Cette hypothèse, qui ne préjuge en rien la cause première des phénomènes magnétiques, n'a été présentée par son auteur que comme servant à lier les phénomènes connus d'une manière plus simple qu'on ne l'avait fait auparavant.

§ IV. *Actions moléculaires dues à l'influence des aimants.*

Changements d'élasticité. Les propriétés physiques des métaux magnétiques peuvent être modifiées au moment de l'aimantation ; M. Wertheim (28) a montré, par exemple, que le coefficient d'élasticité d'un fil de fer aimanté par influence diminue ; qu'avec un fil d'acier, la diminution persiste après la cessation de l'effet d'influence. M. Guillemin a cité un fait indiquant un changement d'élasticité dans une tige de fer soumise à l'aimantation.

Changement de volume. La forme de la matière magnétique peut être modifiée pendant qu'elle est soumise à l'influence de l'aimant ; si le volume ne change pas, d'après M. Joule (29), la barre de fer augmente de longueur et diminue de diamètre, mais d'une quantité très-petite, et cette variation est proportionnelle au carré de l'intensité magnétique développée.

Sons. Les changements moléculaires qui ont lieu dans le fer pendant l'aimantation ou la désaimantation, lorsqu'ils se répètent à des intervalles très-courts, peuvent donner lieu à des vibrations sonores. M. Page (30), en 1837, a le premier observé un effet de ce genre, en approchant le pôle d'un fort aimant d'une spirale plate traversée par un courant électrique. M. Delezenne (31) a

obtenu un effet du même genre en faisant tourner rapidement une armature en fer doux devant les pôles d'un aimant en fer à cheval. Depuis cette époque, ce sujet a été étudié par plusieurs physiciens qui ont modifié les conditions des expériences, et parmi lesquels nous citerons MM. Gassiot, Beatson (32), de la Rive (33), Matteucci, Marrian, Wartmann, et surtout M. Wertheim (34), qui a précisé les circonstances de la production des vibrations sonores.

Quand on transmet directement des courants électriques au travers des tiges de fer ou des fils de ce métal, on remarque également une production de son, qui a été étudiée par M. Beatson et par M. Wertheim; le premier de ces physiciens l'a rapportée à une expansion subite des molécules du fer.

Élévation de température. M. Van Breda (35), en 1845, a manifesté les changements moléculaires qui ont lieu dans le fer aimanté, en montrant qu'il y a élévation de température quand on aimante ou que l'on désaimante ce métal. M. Grove, plusieurs années après (36), a obtenu des effets semblables, et a montré, en outre, que les métaux autres que le fer, le nickel et le cobalt, ne donnent lieu à aucun changement moléculaire de cette nature, ni à aucun son appréciable.

Polarisation circulaire magnétique. Nous allons parler actuellement d'un phénomène très-curieux, dont la découverte a été faite en 1845 par M. Faraday, et qui a contribué à l'impulsion donnée depuis cette époque aux recherches relatives à l'action du magnétisme sur tous les corps, en montrant que des effets moléculaires, autres que des changements de formes ou des attractions et des répulsions, peuvent se manifester dans les corps soumis à l'action du magnétisme. M. Faraday (37) a vu qu'un puissant électro-aimant peut agir sur une substance transparente, de telle sorte que, si un rayon de lumière polarisée traverse cette substance dans la direction de la ligne des pôles ou de l'axe magnétique, le plan de polarisation de ce rayon est dévié, soit à droite, soit à gauche de l'observateur, suivant la direction de l'aimantation. L'action des aimants puissants est donc capable de modifier l'état moléculaire de tous les corps transparents, et de leur faire acquérir, pendant que l'influence magnétique dure, les mêmes propriétés optiques que celles que possède naturellement le quartz parmi les minéraux, et un certain nombre de corps, tels que le sucre, l'acide tartrique, l'essence de citron, l'essence de térébenthine, etc., parmi les substances organiques.

Si l'on place l'écran transparent de façon que le rayon de lumière

polarisée le traverse perpendiculairement à l'axe des pôles de l'électro-aimant, on n'observe aucun effet. Dans les positions intermédiaires entre celle-ci et la ligne des pôles, la rotation du plan de polarisation dépend de l'inclinaison de la ligne visuelle sur l'axe magnétique.

Aussitôt après la publication de la découverte de M. Faraday, plusieurs physiciens ont étudié les effets produits dans cette circonstance : M. Pouillet (38) d'abord, puis M. E. Becquerel (39), qui a opéré avec une intensité magnétique beaucoup plus considérable qu'on ne l'avait fait ; ce dernier a employé pour la première fois des armatures percées d'ouvertures, là où se trouvent les pôles magnétiques, afin de faire passer la lumière au travers du corps soumis à l'action du magnétisme dans la direction même de la ligne de plus forte action. M. E. Becquerel a montré que les cristaux doués naturellement du pouvoir rotatoire naturel pouvaient recevoir la polarisation circulaire magnétique en disposant les appareils de façon à rendre cet effet appréciable ; il a mesuré en outre le magnétisme spécifique des corps soumis à l'expérience, et a montré qu'il n'y avait aucune relation simple entre le pouvoir d'attraction ou de répulsion et la rotation magnétique, si ce n'est que les corps les plus repoussés présentaient en général une action rotative plus énergique.

MM. Matthiesen (40), Matteucci (41), Bertin (42), Wertheim (42'), ont étudié ces phénomènes en faisant varier la nature des substances, leurs distances aux pôles magnétiques, et leur état moléculaire. M. Matteucci et M. Wertheim ont observé que lors de la compression ou de la torsion des corps soumis à l'action de l'aimant, il y a diminution dans la rotation circulaire magnétique ; comme les actions moléculaires font naître la double réfraction dans les corps, et que les substances biréfringentes offrent une action plus faible que les autres, il n'est pas étonnant que le phénomène présente moins d'intensité.

M. Verdet (43) a fait également une étude suivie de ces phénomènes. Parmi les résultats nouveaux qu'il a obtenus nous citerons le suivant : les observations faites antérieurement avaient montré que le phénomène de rotation magnétique du plan de polarisation se produisait toujours dans le même sens sur les différents corps transparents que l'on pouvait essayer, soit solides, soit liquides, mais à un degré plus ou moins marqué, suivant leur nature ; seulement, on avait observé que les sels de fer dissous dans l'eau donnent des dissolutions dont le pouvoir rotatoire était plus faible que celui du

dissolvant. M. Verdet a montré que cela tenait à ce que les sels de fer soumis à l'action magnétique jouissent de la propriété de faire tourner le plan de polarisation dans une direction inverse de celle des autres corps, et il a obtenu des dissolutions alcooliques de chlorure de fer, qui mettent nettement ce fait en évidence. Les dissolutions des sels de nickel, de cobalt, c'est-à-dire des deux autres métaux fortement magnétiques, ne présentent pas cet effet. Certaines dissolutions de manganèse, d'uranium, de lantane, la manifestent, tandis que d'autres dissolutions de ces mêmes sels donnent la rotation dans le même sens que la plupart des autres corps.

Il n'y a aucune conclusion générale à tirer, quant à présent, au sujet d'une relation pouvant exister entre ces derniers effets et l'état magnétique des métaux qui forment la base des combinaisons; ces actions rotatives inverses paraissent dépendre, comme les effets d'attraction et de répulsion, de l'arrangement moléculaire des combinaisons elles-mêmes : c est ainsi que le fer est magnétique, le protoxyde de ce métal paraît l'être fort peu, ainsi que le peroxyde, tandis que l'oxyde intermédiaire l'est très-fortement, et a reçu pour cela le nom d'*oxyde magnétique*.

L'action que la lumière polarisée éprouve en traversant les substances transparentes met en évidence, d'une autre manière que par les mouvements d'attraction et de répulsion, l'action exercée par le magnétisme sur tous les corps. M. Faraday avait pensé que l'effet était dû à l'action exercée de la part du magnétisme sur le rayon lumineux lui-même ; mais cela ne saurait être, car la présence de particules matérielles placées sur la route du rayon lumineux est indispensable pour la production des phénomènes. Ainsi on ne peut attribuer ces effets qu'à un changement moléculaire dans l'état du corps, changement qui doit être symétrique tout autour de la direction de la ligne d'aimantation, et persister tant que l'aimantation dure, ou bien à une influence exercée de la part du magnétisme sur un milieu éthéré qui pénètre les différents corps.

§ V. *Théories imaginées pour expliquer les phénomènes magnétiques.*

Les anciens, comme on l'a vu, connaissaient la propriété dont jouit l'aimant d'attirer le fer. Des philosophes, tels que Thalès, pour expliquer ce fait, supposèrent une âme à cette substance; d'autres, comme Épicure, admirent, les uns, que les atomes de fer s'accro-

chaient dans ceux de l'aimant ; les autres, qu'il y avait autour de cette pierre une émanation capable de faire le vide dans lequel le fer se précipitait. D'autres hypothèses aussi absurdes furent successivement mises en avant : Descartes employa ses tourbillons, qui, dans leur mouvement rapide de l'équateur au pôle, emportaient les aimants, attendu que la matière subtile de ces tourbillons étant poreuse, et celle des aimants formée de molécules branchues, éprouvait une plus grande résistance de la part de ces dernières que de celle des autres corps.

Euler, Dutour et Bernouilli (44) ont attribué les phénomènes magnétiques à des effluves, à une matière magnétique en mouvement. Musschenbroek (45) combattit les effluves, en avouant qu'il n'avait pu découvrir la cause du phénomène.

Æpinus, dans une dissertation publiée en 1757 (46), donna une explication plus satisfaisante, en partant de l'existence d'un seul principe : il essaya de prouver par le calcul que tous les phénomènes magnétiques connus s'expliquaient facilement au moyen des simples lois de l'attraction et de la répulsion. Cette théorie ne put convaincre Euler et Daniel Bernouilli, qui continuèrent à défendre celle de Descartes, en l'appuyant de preuves mathématiques. On reconnut plus tard la nécessité d'admettre deux fluides magnétiques, dont la réunion forme le fluide neutre, de la même manière qu'on avait admis que les deux fluides électriques composent, par leur réunion, le fluide naturel. Pour conserver l'analogie qui existe entre ces deux agents, on supposa aussi que les deux fluides magnétiques pouvaient circuler et se répandre dans le fer ; mais Coulomb, ayant repris cette question, conserva les deux fluides, en rejetant leur circulation dans les corps comme contraire à l'expérience (47).

Poisson, en partant de ces bases, a donné une théorie mathématique des phénomènes magnétiques en repos et en mouvement (48). Il a posé en principe que, dans l'aimantation, les deux fluides qui étaient réunis à l'état neutre se séparent les uns des autres, et que les parties des corps aimantés dans lesquelles s'opère la décomposition, et qu'il appelle *éléments magnétiques*, sont extrêmement petites, ne sont pas en contact, et sont séparées les unes des autres par des espaces pleins ou vides que les deux fluides ne peuvent franchir, et qui sont du même ordre de grandeur que celle des éléments magnétiques. M. Poisson a posé comme il suit le problème : déterminer en grandeur et en direction la résultante des attractions ou répulsions exercées par tous les éléments magnétiques

d'un corps aimanté de forme quelconque, sur un corps pris en dehors ou dans son intérieur. En ajoutant aux composantes de cette force relative à un point intérieur, celles des forces extérieures qui influent sur ce corps, on a les forces totales qui tendent à séparer les deux fluides réunis en ce point; or, si la matière du corps n'oppose aucune résistance au déplacement des deux fluides, il sera nécessaire, pour que l'équilibre magnétique ait lieu, que ces forces totales soient égales à zéro, sans quoi elles produiraient une nouvelle décomposition de fluide neutre, et l'état magnétique du corps serait changé. Si la force coercitive n'est pas nulle, il suffit que la résultante de toutes les forces extérieures et intérieures qui agissent en un point quelconque de ce corps, ne surpasse nulle part la grandeur donnée de la force coercitive, dont l'effet serait analogue à celui du frottement dans les machines. Il en résulte, dans ce cas, que l'équilibre magnétique peut subsister d'une infinité de manières différentes.

M. Poisson s'est borné à considérer l'aimantation d'un corps aimanté par influence, pour laquelle la force coercitive est nulle; les deux fluides sont alors transportés sur les surfaces des éléments magnétiques, où ils forment une couche bien mince relativement aux dimensions de ces éléments. En partant des données précédentes, il a aussi essayé de déterminer la distribution du magnétisme dans les aiguilles d'acier aimantées à saturation et dans les aiguilles de fer doux aimantées par influence; il en a déduit les lois qui sont connues de leurs attractions ou répulsions mutuelles. Il a donné, pour tous les cas, les équations qui renferment les lois de la distribution du magnétisme dans l'intérieur des corps aimantés par influence, et celles des attractions ou répulsions qu'ils exercent sur des points donnés de position; mais la résolution de ces équations, pour en déduire des résultats comparables à l'expérience, n'est possible que dans un nombre de cas très-limité, eu égard aux différentes formes des aimants. Celui que Poisson a pris pour exemple admet une solution complète, c'est celui d'une sphère pleine ou creuse, aimantée par des forces dont les centres d'action sont distribués d'une manière quelconque au dehors ou dans son intérieur. En réduisant ces forces à une seule, à l'action magnétique de la terre, les formules deviennent très-simples; on en déduit sans difficulté la déviation d'une aiguille de boussole produite par le voisinage d'une sphère aimantée par l'influence de la terre. Les lois de la variation de cette déviation

données par le calcul s'accordent avec celles que M. Barlow (49) a trouvées par l'expérience. Le calcul démontre aussi que l'action d'une sphère creuse est à très-peu près indépendante de son épaisseur, tant que le rapport de celle-ci au rayon n'est pas une très-petite fraction qui peut changer de valeur avec la matière et la température de la sphère.

M. Poisson, enfin, a trouvé que les équations générales peuvent être résolues dans le cas d'un ellipsoïde quelconque, pourvu que la force qui produit son aimantation soit constante en grandeur et en direction dans toute son étendue, ce qui a lieu à l'égard du magnétisme terrestre.

Aussitôt après la découverte d'Œrsted, Ampère, comme on l'a vu page 72, conçut l'idée d'une hypothèse sur la constitution des aimants, qui le conduisit à la découverte de l'action des courants les uns sur les autres. Il trouva ensuite qu'en transmettant un courant à travers un fil conducteur tourné en hélice autour d'un cylindre, de manière à former une suite de courants circulaires égaux, dirigés dans le même sens, et dont les plans étaient perpendiculaires à une même ligne droite, cette série de courants circulaires, appelée *solénoïde,* se comportait comme un aimant relativement à un aimant ou à un courant.

En calculant les actions exercées par un élément de courant sur un solénoïde, Ampère a été conduit à ce résultat, que les actions se réduisent à deux forces dirigées suivant des perpendiculaires passant par les extrémités du solénoïde et de l'élément; ces forces, en outre, sont en raison inverse du carré des distances qui séparent l'élément de courant et ces extrémités. D'après cela, Ampère, au lieu de supposer que le magnétisme est dû à l'action de deux fluides particuliers, attribue les phénomènes auxquels il donne naissance, à des courants électriques qui se meuvent autour des particules des corps.

Ces courants existeraient donc dans tous les corps sensibles à l'action du magnétisme. Dans les corps à l'état naturel, les courants électriques circuleraient dans tous les azimuts possibles autour des molécules, et l'effet de l'aimantation serait de donner à ces courants des directions tendant à devenir parallèles, et dont les actions sur des courants extérieurs expliqueraient les attractions et répulsions (50). D'après l'hypothèse d'Ampère, un aimant ne serait donc pas un seul solénoïde, mais une réunion de solénoïdes parallèles.

La théorie d'Ampère, quoique plus compliquée que celle de

Coulomb, a cela de remarquable, qu'elle lie les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques; comprenant par conséquent un plus grand nombre de faits que les autres théories, elle doit actuellement leur être préférée. Si le magnétisme et l'électricité paraissent dus à des modifications du même agent, on se demande si l'on ne pourrait pas rendre compte des courants électriques par une distribution des fluides magnétiques, comme on explique les phénomènes magnétiques par l'action des courants électriques : c'est là une question de principe qui ne peut être résolue dans l'état actuel de la science.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE V.

(1) *Savants étrangers de l'Institut de France*, t. IX, p. 198.

(2) Becquerel, *Traité d'électricité et de magnétisme*, t. II, p. 357.

(3) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XX, p. 1708, et Becquerel, *Traité d'électricité*, en 3 vol., t. II, p. 31.

(4) *Cours de chimie et de physique*, 3e série, t. L, p. 385.

(5) Matteucci, *Cours spécial sur l'induction*, Paris, 1854, p. 228.

(6) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXX, p. 113.

(7) Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 103.

(7') *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. XX, p. 107.

(8) *Comptes rendus*, t. XX, p. 1708, et Becquerel, *Traité du magnétisme*, p. LXVI.

(9) *Philosophical Transactions*, 1822.

(10) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXV et XXXVI.

(11) *Bulletin des sciences mathématiques de Ferussac*, t. VIII, p. 87.

(12) *Bibliothèque de Genève*, t. II, p. 340.

(13) *Philosophical Mag.*, 1845. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. II, p. 42 et 145, 1846.

(14) *Annales de pogg*, t. LXXIV, p. 421. — *Archives des sciences physiques de Genève*, t. IX, p. 307. — *Annales de physique et de chimie*, 3e série, t. XXIX p. 129.

(15) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVIII, p. 283.

(16) *Idem*.... t. XXXII, p. 68.... et t. XLIV. p. 209.

(17) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIV, p. 424.

(18) *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XXIII, p. 105.

(19) Matteucci, *Cours spécial sur l'induction, le magnétisme et le diamagnétisme*. Paris, 1854.

(19') *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XXXVIII, p. 562.

(20) *Philosophical Magazine*, décembre 1847. — *Annales de chimie et de physique*, t. XXXIV, p. 240.

(21) *Mémoire présenté à l'Académie des sciences* le 21 mai 1849. *Annales*

de chimie et de physique, t. XXVIII, p. 283 ; t. XXXII, p. 68 et t. XLIV, p. 209.

(22) *Biblioth. univ. de Genève*, nouv. série, t. I, p. 70 ; t. II, p. 42 et 145, et t. III, p. 338.

(23) *Annales de chimie et de physique*, t. XXIX, p. 129 ; t. XXXIV, p. 242.

(24) *Idem*, t. XXXVI, p. 127 et 254.

(25) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXIV, p. 1107 (1847).

(26) *Annales de chimie et de physique*, t. XXXVI, p. 247.

(27) *Idem*, p. 275.

(28) *Idem*, 3e série, t. XII, p. 610.

(29) *Biblioth. univ.*, t. IV, p. 398 et t. V, p. 51.

(30) *American journal*, juillet 1837. — *Biblioth. univ. de Genève*, nouv. série, t. II, p. 398 (1839).

(31) *Idem*, t. XVI, p. 406 (1841).

(32) *Electric. mag.*, avril 1845. — *Archives de l'électricité*, t. V, p. 197.

(33) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVI et t. XXVI. — *Archives de l'électricité*, t. V, p. 200, et *Biblioth. de Genève*, t. IX, p. 193 et 265.

(34) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIII, p. 302.

(35) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXI, p. 961.

(36) *Bibliothèque universelle de Genève*, t. XII, p. 210.

(37) *Philosophical Transactions*, 1845. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. I, p. 70 et p. 385, et t. III, p. 338.

(38) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XXII, p. 135.

(39) *Annales de chimie et de physique*, nouvelle série, t. XVII, p. 437 et t. XXVIII, p. 283.

(40) *Biblioth. univ.*, t. V, p. 126 et 212.

(41) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVIII, p. 493.

(42) *Idem*, t. XXII, p. 5.

(42') *Idem*, t. XL, p. 156.

(43) *Idem*, 3e série, t. XLI, p. 370 ; t. XLIII, p. 37, et *Comptes rendus de l'Académie*, t. XLIII, p. 529 (1856). — *Idem*, t. XLV, p. 33.

(44) *Collection des prix de l'Académie des sciences, pour* 1746.

(45) Muschenbroek, *Essais de physique*, p. 46

(46) Œpinus, *Tentamen Theoriæ electricitatis et magnetismi*, 1757.

(47) *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut*, 1789, p. 481.

(48) *Idem*, t. V, 1821 et 1822 ; pages 247 et 488.

(49) *An essay on magnetic attraction*, etc., P. Barlow, 2e édition ; London, 1823. — Becquerel, *Traité d'électricité*, en 7 vol., t. II, p. 343 ; *idem*, *Traité de magnét. terrestre*, p. XXXIX. — Brewster, *Treatise of magnetism*., p. 145, 1837.

(50) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVI, p. 252.

CHAPITRE VI.

Magnétisme terrestre.

---

§ I. *Boussoles et magnétomètres. — Recherches relatives aux divers éléments de la résultante des forces magnétiques terrestres.*

On a vu précédemment, pages 58 et suivantes, qu'il est probable que les Chinois se servirent de la propriété directrice de l'aiguille aimantée pour se conduire sur terre, dans les premiers siècles de l'ère chrétienne et peut-être auparavant ; que la déclinaison ne fut guère connue que dans le treizième siècle, et l'inclinaison en 1576. Depuis, les navigateurs et même les physiciens se sont occupés d'observer ces deux éléments de la force terrestre, sur tous les points du globe ; les boussoles ayant été perfectionnées, ainsi que les méthodes d'observations, on a pu recueillir des déclinaisons et des inclinaisons de plus en plus exactes. A ces deux éléments on a joint les observations relatives aux variations diurnes, et à l'intensité de la composante horizontale ; mais, avant d'aborder toutes ces observations et les conséquences qu'on en a déduites, parlons des perfectionnements apportés aux boussoles.

Les boussoles de déclinaison et de variation horaires ont été pourvues d'aiguilles ou de barreaux d'acier trempé, aimantés à saturation, suspendus tantôt au moyen de chapes en agate sur des pivots d'acier très-fins, tantôt, suivant leur poids, à des fils simples de cocon ou à un assemblage de fils de cocon sans torsion.

Coulomb (1) a reconnu qu'à longueur égale, à même poids et même épaisseur, une lame taillée en flèche avait un moment de rotation plus grand qu'un parallélogramme rectangle ; que, pour donner à l'aiguille le plus de magnétisme possible, il ne fallait pas que la trempe fût très-roide, attendu qu'à partir de cette trempe, le magnétisme allait toujours en augmentant dans tous les degrés de recuit, jus-

qu'à ce qu'il fût d'un rouge très-sombre. Le magnétisme diminue ensuite à mesure que la température du recuit augmente : il a constaté encore que le temps des oscillations décroissait à peu de chose près proportionnellement aux diminutions des lames, et que le temps total des oscillations est plus grand, épaisseur et longueur égales, pour des lames larges que pour des lames étroites.

Coulomb s'est occupé du mode de suspension des aiguilles, qui est d'une grande importance, puisqu'il faut éviter le frottement des pivots et la torsion des fils. Dans les recherches délicates, il a conseillé de rejeter les pivots pour ne se servir que d'un assemblage de fils de soie sans torsion.

Les travaux de Coulomb sur la distribution du magnétisme dans les aimants avaient été exécutés sur des fils d'acier aimanté régulièrement et à saturation dans chaque moitié, et dont la température était constante ; il était important, pour les recherches relatives au magnétisme terrestre, de déterminer cette distribution en tenant compte de l'action terrestre, quand les fils n'étaient pas aimantés à saturation, que l'on renverse les pôles, et que la température change dans toutes les parties ou dans quelques-unes. Cette détermination a été faite, d'une part, par M. Kupffer (2), et, de l'autre, par M. Quetelet (3). Le premier a donné une formule qui permet de ramener à une température donnée le nombre d'oscillations obtenues à une température quelconque, et ainsi qu'on l'a vu page 100.

Gambey (4), qui a apporté dans la construction des instruments d'astronomie et de physique un degré de perfection qu'il est difficile de dépasser, a construit des boussoles de tous genres, qui sont très-recherchées des observateurs ; ces boussoles, ainsi que d'autres construites par des artistes également habiles, ont été employées à l'exclusion de tous autres appareils magnétiques, jusqu'à ce que Gauss eût imaginé les magnétomètres (5).

Ces derniers appareils sont construits de telle sorte que l'on peut estimer des fractions très-petites du déplacement d'un fort barreau aimanté ; à cet effet, on mesure la déviation, non pas directement, mais bien par le déplacement de l'image d'une mire fixe, vue par réflexion sur un miroir fixé au barreau et se mouvant avec lui. Avec les magnétomètres, on mesure la déclinaison absolue, l'intensité et les variations diurnes.

Le barreau aimanté étant très-rarement en repos, il est presque impossible de déterminer immédiatement sa position dans l'état de repos, comme on le fait avec l'aiguille des boussoles, dont la sensi-

bilité n'est pas aussi grande à beaucoup près. On ne s'attache pas dès lors à chercher la position que le barreau occupe au moment de l'expérience, mais bien celle qu'il aurait s'il se trouvait exactement dans le méridien magnétique.

Gauss, en suspendant le barreau à un double fil, a formé le magnétomètre, dit magnétomètre bifilaire, construit sur les principes qui ont guidé M. Harris dans l'établissement de sa balance électrique. Ce magnétomètre est déjà en usage depuis un certain nombre d'années, non-seulement dans l'observatoire magnétique de Gœttingue, mais encore dans celui de Bruxelles et dans d'autres observatoires, pour déterminer la valeur absolue de la déclinaison, ainsi que les variations régulières et irrégulières qu'elle éprouve d'année en année, de mois en mois, de jour en jour, d'heure en heure, et même de minute en minute.

Depuis plusieurs années, on a eu recours, dans les observatoires magnétiques, aux instruments enregistreurs, qui donnent, par un tracé graphique, soit à l'aide de procédés mécaniques, soit par la photographie, la position de divers barreaux aimantés aux différentes heures de la journée ; mais les causes d'erreurs auxquelles ces appareils sont assujettis font que l'on n'a pu en tirer parti que pour les variations des divers éléments dont se compose la force magnétique du globe, et non pour des mesures absolues.

Attraction locale des vaisseaux, et moyens de s'en préserver. Guillaume Denys (6), hydrographe à Dieppe, avait déjà remarqué, en 1666, que deux compas placés en différents points d'un navire ne donnaient jamais les mêmes indications. Wales, qui accompagnait Cook dans ses voyages, est le premier qui paraît s'être occupé des grands dérangements qu'éprouve souvent l'aiguille aimantée de la part des influences locales. Un certain nombre d'années se passèrent sans qu'il fût question de ce sujet important. Il faut remonter jusqu'en 1794 pour avoir quelques observations sur l'attraction locale des vaisseaux due au fer placé à bord.

Le capitaine Flinders, en 1801 et 1802, observa de grandes différences dans la direction de l'aiguille, selon que la proue du vaisseau était à l'occident ou à l'orient : il crut devoir en conclure que les pouvoirs d'attraction des diverses parties du vaisseau qui sont capables d'affecter la boussole, étaient concentrés comme en un point focal ou centre d'action, et que ce point était presque au centre du vaisseau, là où le plus communément se trouvait la plus grande masse de fer, tels que boulets, chaînes, ancres, etc.

Depuis, les navigateurs anglais n'ont cessé de faire des expériences sur cet important sujet ; mais il était réservé à M. Barlow de découvrir un moyen très-simple pour corriger en grande partie les effets de cette cause perturbatrice. Avant cette époque, on employait diverses précautions pour se garantir de l'action perturbatrice exercée par les fers des vaisseaux sur l'aiguille de la boussole. Nous citerons celle dont fit usage le capitaine Duperrey (7), avant son départ pour son voyage de circumnavigation pendant les années 1822, 1823, 1824 et 1825, sur la corvette *la Coquille*, pour combattre avec un grand succès l'influence produite sur l'aiguille aimantée par les masses métalliques qui se trouvaient à bord. Les canons du gaillard d'arrière avaient été supprimés, et l'on avait chevillé et cloué en cuivre tout ce qui entourait le lieu des observations magnétiques, jusqu'à une distance de 3 à 4 mètres ; au moyen de ces arrangements des expériences faites sous diverses latitudes prouvèrent que l'on pouvait négliger l'influence des fers du navire sur l'aiguille aimantée.

M. Barlow (8), pour corriger les effets de l'attraction locale, est parti de ce principe, que les diverses masses de fer qui se trouvent à bord des bâtiments acquièrent la polarité magnétique sous l'influence de l'action du globe, et qu'elles agissent ensuite sur les boussoles comme pourraient le faire de véritables aimants. Ce principe posé, il admet que, si l'on fait varier en même temps la distance et l'élévation d'une plaque de fer doux, par rapport à une aiguille aimantée horizontale, on peut trouver une position où cette plaque exerce la même action que les pièces de fer qui se trouvent sur le bâtiment ; dès lors, cette plaque, placée d'un certain côté de l'aiguille, doit détruire les effets de l'attraction locale. M. Barlow a tiré de là la conséquence que, la plaque et les masses ferrugineuses étant modifiées de la même manière suivant la latitude magnétique des lieux où l'on observe, ce mode de compensation n'aurait pas besoin d'être changé.

Poisson (9) a fait aussi des recherches sur les moyens de se garantir des effets de l'attraction locale. Il a commencé par faire remarquer que les déviations de l'aiguille aimantée par l'effet de l'attraction locale n'étant qu'imparfaitement détruites au moyen de la plaque de fer doux au point de départ, il était à craindre qu'elles ne devinssent plus sensibles sous d'autres latitudes ; c'est ce que l'expérience a confirmé.

Poisson s'est proposé, dans son mémoire, de déterminer directe-

ment l'inclinaison et la déclinaison vraies en un lieu quelconque du globe, d'après les observations de la boussole faites à bord d'un vaisseau sous l'influence du fer qu'il contient, en s'appuyant sur ce principe, que, le fer étant aimanté par la force magnétique de la terre, son action sur l'aiguille doit être proportionnelle à cette force.

Influence des masses de fer sur la marche des chronomètres. — Le capitaine Buchan, dans son voyage aux régions arctiques, en 1818, reconnut que la marche des chronomètres n'était pas la même, à beaucoup près, à bord qu'à terre : cette différence fut attribuée aux masses de fer du navire. M. Barlow (10), frappé de cette différence, a cherché à prouver jusqu'à quel point la proximité de masses de fer pouvait influencer la marche des chronomètres, et dans le cas où cette action aurait lieu, s'il était possible d'en déterminer les lois.

M. Fisher (11) paraît être le premier qui ait cherché à montrer qu'en général la marche des chronomètres recevait une action de la part des masses de fer voisines. M. Barlow attribua cet effet à ce que le ressort ou quelque partie du balancier devenait magnétique : D'après les observations de M. Fisher, cette marche devait être uniformément accélérée; M. Barlow émit l'opinion au contraire que, suivant la direction du balancier par rapport au fer, l'amplitude des oscillations devait éprouver une altération en plus ou en moins. D'après cela, le balancier ou au moins son ressort, acquérant la polarité magnétique, doit tendre à prendre une certaine direction lorsqu'il se trouve sous la sphère d'activité d'une masse de fer; l'intensité de sa force peut être calculée en comptant le nombre d'oscillations qu'une petite aiguille de fer exécute dans un temps donné, dans une situation quelconque, relativement au fer. C'est ce qu'a fait M. Barlow conjointement avec M. Evans : leurs expériences ont conduit à cette conséquence, qu'à bord d'un vaisseau on doit éloigner avec soin les chronomètres, ainsi que les boussoles, du voisinage des masses de fer.

Détermination de l'intensité absolue des forces terrestres. La résultante des forces magnétiques terrestres en différents points du globe éprouve-t-elle avec le temps des changements? C'est une question de physique terrestre d'un grand intérêt. Si l'on pouvait construire des aiguilles parfaitement identiques, qui prissent constamment la même quantité de magnétisme, la question serait facile à résoudre, puisqu'il suffirait de faire osciller la même aiguille

dans le même lieu, à la même heure et au même jour de l'année ; mais cette permanence de l'état magnétique dans une même aiguille ne pouvant être stable, à raison des différences de température, qui modifient la trempe et son degré d'aimantation, on a été forcé de renoncer à des méthodes directes pour en employer d'indirectes : la première qui ait été proposée est celle de Poisson, qui n'a fait que de l'indiquer; Gauss (12) l'a rendue pratique.

La méthode de Poisson exige l'emploi d'aiguilles identiques sous le rapport de leur constitution et de leur magnétisme, et nullement une valeur déterminée de l'aimantation qu'on leur a donnée. Poisson a proposé de faire osciller séparément deux aiguilles d'acier aimantées à saturation, et librement suspendues par leur centre de gravité; de déterminer le temps de chacune de leurs oscillations, et de placer ensuite les centres de gravité des deux aiguilles sur une même ligne droite, parallèle à la force directrice du globe : alors ces deux aiguilles se dirigent suivant cette ligne; puis on fait osciller successivement chacune de ces aiguilles, sous les actions réunies de la terre et de l'aiguille aimantée en repos, en déterminant également la durée de chacune des nouvelles oscillations. Enfin on mesure la distance des centres de gravité de ces deux aiguilles et leurs moments d'inertie rapportés à leur axe de rotation passant par ces mêmes points. Les résultats fournis par toutes ces expériences suffisent pour calculer la valeur de l'intensité magnétique du globe à une époque déterminée, indépendamment de l'intensité magnétique des aiguilles aimantées.

Il suffit, pour appliquer cette méthode, que l'aimantation des aiguilles ne change pas pendant la durée de l'expérience par leur action mutuelle et par celle de la terre; conditions faciles à remplir, en opérant avec des aiguilles dans lesquelles la force coercitive soit peu considérable.

M. Gauss (13), à l'aide d'un appareil approprié à cet usage, a fait plusieurs déterminations de mesure absolue d'intensité magnétique dans l'observatoire magnétique de Gœttingue; les nombres obtenus pour les années 1834, 1837, ne présentent que de bien faibles différences. Depuis cette époque, ces déterminations sont faites dans tous les observatoires magnétiques.

§ II. *Observations magnétiques faites en différents lieux du globe.*

Depuis les premiers travaux de M. de Humboldt sur le magnétisme terrestre au commencement de ce siècle, on s'occupe dans tous les observatoires de déterminer les divers éléments de la résultante des forces magnétiques terrestres, ainsi que les variations auxquelles ils sont soumis. Bien que les méthodes d'observation aient été perfectionnées, il règne cependant encore de l'incertitude sur la valeur que l'on doit attacher aux résultats obtenus : cette exactitude eût-elle été constatée, on ne voit pas comment on pourrait établir des formules donnant les variations auxquelles ils sont soumis, puisque les lignes magnétiques tracées sur la surface du globe se déforment en se déplaçant. Les erreurs dans les observations doivent être attribuées à plusieurs causes : 1° aux petites dimensions des instruments, ce qui les rend susceptibles de moins de précision ; 2° à la détermination des axes des aiguilles, laquelle laisse quelquefois à désirer ; 3° aux causes locales, dont on ne connaît pas toujours l'influence, etc., etc. Ce sont ces motifs qui ont fait sentir la nécessité que des observations fussent faites à diverses reprises, dans les mêmes lieux, par des observateurs et des instruments différents, en variant les stations et les circonstances des observations.

Les observations magnétiques peuvent se diviser en deux catégories : la première comprend toutes les observations faites à poste fixe dans les observatoires magnétiques où les causes locales sont les mêmes, de sorte que leur influence se fait sentir sur tous les résultats obtenus ; la seconde comprend les observations faites tant sur terre que sur mer, où les influences locales, changeant d'un lieu à un autre, rendent plus difficile la comparaison des résultats obtenus dans des lieux différents et à des époques différentes.

Dans tous les observatoires de l'Europe, on se livre depuis plus de trente ans à des observations suivies ; nous citerons, entre autres, celles qui ont commencé à Bruxelles en 1827, sous la direction de M. Quetelet : depuis cette époque, la déclinaison et l'inclinaison absolues, ainsi que l'intensité horizontale et l'intensité verticale, ont été déterminées d'année en année ; en sorte que l'on a aujourd'hui pour cette localité une des séries les plus complètes en ce genre. Au commencement de 1841, les observations ont été faites régulièrement à treize époques différentes du jour et de la nuit,

dans le but de constater les variations diurnes des divers éléments de la résultante terrestre.

M. Laugier a proposé, pour étudier tous les éléments du magnétisme terrestre dans un lieu particulier du globe, une méthode qui diffère de la méthode en usage, en ce que les observations, au lieu d'être faites en un point unique, devraient avoir lieu simultanément en plusieurs stations convenablement choisies, dans un rayon d'une certaine étendue. Au moyen de ces observations, on déterminerait suivant deux axes coordonnés les composantes des variations de l'élément magnétique qu'on aurait mesuré directement, et on en déduirait une équation qui donnerait, pour un point compris entre les stations, la valeur de l'élément magnétique en fonction des coordonnées de ce point.

C'est ainsi qu'à l'aide d'un certain nombre de déclinaisons observées aux environs et dans l'intérieur de Paris, M. Laugier (14) a pu établir l'équation donnant la déclinaison en un point quelconque de la ville. Cette même équation fait connaître la direction de la ligne d'égale déclinaison à Paris, celle de la ligne suivant laquelle on observerait la plus forte variation en s'avançant d'une quantité donnée, etc. Il a conclu de ses mesures que les déclinaisons mesurées à l'observatoire de Paris ne sont pas sensiblement altérées par les attractions locales. En procédant de la même manière, MM. Goujon et Liais ont trouvé une déviation de 6′ environ; mais, pour répondre d'une quantité aussi petite, il serait nécessaire de s'appuyer sur un très-grand nombre de mesures : on sait en effet combien sont délicates les observations de cette nature.

Observations de déclinaison. Les premiers qui observèrent à bord des bâtiments la déclinaison de l'aiguille aimantée négligèrent l'action exercée sur la boussole par le fer des vaisseaux; les résultats qu'ils obtinrent furent donc entachés d'erreurs, qu'il était, du reste, impossible d'éviter à cette époque.

Halley est le premier qui ait essayé de réunir et de coordonner ensemble le grand nombre d'observations de déclinaison faites jusqu'à lui; en 1700, il publia une carte marine dans laquelle sont tracées les lignes d'égale déclinaison de 5 en 5°. Cette carte, à l'époque où elle parut, fit sensation, parce qu'elle permettait de saisir d'un seul coup d'œil la marche de la déclinaison, depuis l'équateur jusqu'aux parties les plus septentrionales où les voyageurs étaient parvenus. Des changements étant survenus dans la déclinaison, et les méthodes d'observation ayant été perfectionnées, on

sentit de jour en jour combien les indications de la carte d'Halley devenaient défectueuses.

En 1745 et 1746, Mountain et Dodson, ayant eu à leur disposition les registres de l'Amirauté anglaise et les mémoires de plusieurs officiers de marine, publièrent une nouvelle carte des déclinaisons.

Churchman fit paraître, en 1794, un atlas magnétique, dans lequel il essaya de donner les lois de la déclinaison, en s'appuyant sur l'existence de deux pôles magnétiques, dont l'un était placé, pour 1800, sous la latitude de 58° nord, et sous la longitude de 134° ouest de Greenwich, très-près du cap Fairweather, et l'autre sous la latitude de 58° sud, et sous la longitude de 165°. Churchman avança, en outre, que le pôle nord effectuait sa révolution en 1096 ans, et le pôle sud en 2289.

Cet ouvrage avait été précédé d'un autre plus remarquable, qui parut en 1787, et dans lequel son auteur, Hansteen, donna le tableau le plus complet qu'on ait encore eu des observations de déclinaison. Cet ouvrage est accompagné d'un atlas magnétique où se trouvent toutes les lignes d'égale déclinaison. Le défaut de symétrie de ces lignes était tel qu'on dut en conclure que les causes d'où dépend le magnétisme terrestre étaient réparties irrégulièrement sur la surface du globe.

M. Barlow reprit ce travail en 1823. Le capitaine Duperrey publia en 1836 de nouvelles cartes, dans lesquelles la déclinaison de l'aiguille aimantée se trouve employée selon sa véritable destination, qui est de faire connaître la direction du méridien magnétique en chaque point du globe où elle a été observée, et, par suite, la figure générale de courbes qui ont la propriété d'être, d'un pôle magnétique à l'autre, les méridiens magnétiques de tous les lieux où elles passent.

M. Becquerel a rapporté dans son *Traité du magnétisme terrestre* les principales observations de déclinaison qui ont été faites depuis le commencement du siècle par les astronomes et les voyageurs les plus distingués. Il a présenté ensuite comme exemple de séries complètes les observations de déclinaisons recueillies par le capitaine Parry dans les mers polaires, sur le rivage ou sur la glace, hors de l'influence du fer des vaisseaux, là où la composante horizontale est très-faible, et qui sont les premières recueillies dans ces régions ; puis celles que le capitaine Duperrey a faites pendant les relâches de son voyage à bord de *la Coquille*. Les observations du

capitaine Parry, faites dans le même lieu, présentent des différences de 2, 3 et même 7°, qui tiennent probablement à ce que, la résultante des forces magnétiques terrestres étant presque verticale, la force directrice horizontale doit être influencée par les causes les plus légères.

Aujourd'hui, à l'aide des méridiens magnétiques de M. Duperrey, on conçoit comment il se fait que dans les régions polaires la déclinaison éprouve des variations notables quand on parcourt de faibles distances sur le même parallèle; nous verrons plus loin le parti que l'on a tiré de toutes ces observations.

Variations de la déclinaison. Faute d'observations, on ne peut remonter au delà de 1580 pour avoir quelques notions précises sur les changements séculaires survenus dans la déclinaison. A cette époque, à Paris, l'extrémité nord de l'aiguille déviait à l'est de 16° 30′; en 1663, l'aiguille se trouvait dans le méridien terrestre; depuis lors, la déclinaison est devenue occidentale : en 1816 elle avait atteint son maximum, et depuis elle a continué à diminuer. Si l'on compare les observations faites à Paris avec les observations recueillies à Londres, on voit que le maximum de déviation a eu lieu dans ces deux localités en 1580; que de 1657 à 1662, à Londres, la déclinaison était nulle, tandis qu'à Paris elle ne l'a été qu'en 1663; que le maximum de déclinaison à l'ouest a eu lieu à Londres en 1815, et à Paris en 1816. Ainsi les deux maxima ont eu lieu à l'est et à l'ouest sensiblement aux mêmes époques à Paris et à Londres.

Les déclinaisons observées au cap de Bonne-Espérance montrent que les variations séculaires dans l'hémisphère sud suivent une marche analogue à celle que l'on observe dans notre hémisphère. On la voit légèrement à l'est en 1605; de 1605 à 1609, elle devient nulle, puis passe à l'ouest, atteint son maximum vers 1791, et rétrograde vers l'est.

M. Barlow a essayé de déduire d'une formule les changements progressifs et séculaires qu'éprouve la déclinaison de l'aiguille aimantée : en admettant que le pôle magnétique qui influence l'aiguille à Londres était placé, en 1818, sous la latitude nord 75° 2′, et la longitude 67° 41′ ouest, il en a tiré la conséquence que le mouvement était uniforme et de 4° 14′ en dix ans; les différences entre les résultats du calcul et les observations sont très-faibles.

L'aiguille aimantée est soumise encore à des oscillations annuelles qui paraissent se rattacher à la position du soleil à l'époque des

équinoxes et des solstices, et dont on doit la découverte à Cassini; oscillations qui sont encore les mêmes dans les caves de l'Observatoire, où la température est sensiblement constante. M. Arago, en discutant les observations faites dans divers lieux, a trouvé un maximum de déclinaison vers l'équinoxe du printemps et un minimum au solstice d'été, avec cette différence, que l'amplitude de l'oscillation a été moindre à Londres qu'à Paris.

L'aiguille aimantée, outre les observations séculaires et annuelles, est soumise encore à des changements diurnes qu'on observe avec le plus grand soin dans tous les observatoires de l'Europe.

Depuis 1722, époque où Graham découvrit ces variations, on a constamment observé leur marche, dans le but de remonter, s'il était possible, à la cause du phénomène. On a reconnu qu'en Europe, l'extrémité boréale de l'aiguille horizontale marche tous les jours de l'est à l'ouest, depuis le lever du soleil jusque vers une heure après midi, et retourne ensuite vers l'est par un mouvement rétrograde, de manière à reprendre, à très-peu près, vers dix heures du soir, la position qu'elle occupait le matin; que, pendant la nuit, l'aiguille est presque stationnaire, et recommence le lendemain ses excursions périodiques.

A Paris, la moyenne de la variation diurne est, pour avril, mai, juin, juillet et septembre, de 13 à 15 minutes de degrés, et pour les autres mois, de 8 à 10′. Il y a des jours où elle s'élève à 25′, et d'autres où elle ne dépasse pas 5 ou 6′. Le maximum de déviation n'a pas lieu à la même heure sur les différents points du globe : on observe la déviation orientale à 8 heures du matin à Freyberg, Nicolaïeff et Saint-Pétersbourg; à 9 heures à Cazan; le maximum de la déviation occidentale à 2 heures après midi à Cazan, Nicolaïeff, Saint-Pétersbourg, et à 1 heure à Freyberg.

Les variations diurnes dans le Nord ont été observées à Bosseckop (West-Finmark) par MM. Bravais, Lellichooke, Lottin et Silvestrom, faisant partie de l'expédition française envoyée par le gouvernement français en 1837 et 1838 dans le Nord, sous la direction de M. Gaymard. Les observations recueillies montrent que pendant la nuit l'aiguille est plus agitée que dans nos contrées, et que l'amplitude des oscillations n'y est pas aussi étendue qu'on l'avait avancé.

Dans l'autre hémisphère, au fort Marlborough de Sumatra et à l'île Sainte-Hélène, où John Magdonall (14[1]) a fait deux séries d'observations de variations de l'aiguille de déclinaison, de 1794 à 1796,

ces observations conduisent à deux conséquences importantes : l'une, que les variations diurnes entre les tropiques ont sensiblement moins d'étendue qu'en Europe ; l'autre, qu'aux mêmes heures où dans l'hémisphère boréal l'extrémité nord de l'aiguille marche à l'ouest, ce mouvement dans l'hémisphère austral s'exécute en sens contraire. Les observations beaucoup plus récentes de MM. Freycinet et Duperrey ont confirmé la première de ces conséquences. Quant à la seconde, elle l'a été jusqu'à présent par les observations faites dans les régions tempérées et dans une partie de la zone intertropicale ; mais tout porte à croire que la limite des variations diurnes ne coïncide pas avec la ligne équinoxiale, ni même avec la ligne sans inclinaison.

M. de Humboldt (15), en passant à Gœttingue en septembre 1829, témoigna le désir à M. Gauss de faire, dans le jardin de l'observatoire, des observations simultanées sur l'intensité magnétique et les variations diurnes ; en employant des méthodes différentes, ils obtinrent des résultats qui ne différaient entre eux que de 0″,05. Ce parfait accord frappa Gauss, qui fut convaincu que dans ce genre d'observation on pouvait obtenir la précision mathématique. Il conçut dès lors le projet que des physiciens se livrassent comme lui, avec ses appareils, sur différents points de l'Europe, à des observations suivies et à des époques fixes de l'année, qu'on a appelées périodes ou termes d'observation.

MM. Gauss et Weber ont reconnu la nécessité, pour embrasser l'ensemble des observations, de les tracer sur des cartes particulières au moyen d'axes coordonnés, en prenant pour abscisses les heures ou minutes, et pour ordonnées les valeurs des observations. Les tracés graphiques indiquent que les vents les plus violents et les mouvements atmosphériques du même ordre n'altèrent en rien le phénomène des variations de l'aiguille aimantée, en n'ayant pas égard aux anomalies qu'ils présentent nécessairement.

Depuis, la Société royale de Londres, d'accord avec l'association de Gœttingue, ont arrêté que des observations magnétiques seraient faites tous les mois, pendant vingt-quatre heures, sans interruption, dans le but d'étudier les variations horaires des composantes de la résultante terrestre sur différents points du globe ; l'Angleterre, l'Allemagne, la Belgique, etc., ont répondu à l'appel.

Variations irrégulières de la déclinaison. Influence de l'aurore polaire. Une foule d'observations faites sur différents points du globe prouvent que la marche régulière de l'aiguille aimantée est

souvent dérangée par des causes qui ont, pour la plupart, échappé jusqu'ici à toutes les investigations. Parmi celles qui sont connues et dont on a observé les effets, nous citerons l'apparition d'une aurore boréale, non-seulement dans les lieux où elle est visible, mais encore dans des lieux qui en sont très-éloignés ; on a indiqué aussi les éruptions volcaniques, les tremblements de terre.

Parmi les physiciens qui se sont le plus occupés de constater l'influence qu'exercent les aurores boréales sur la marche diurne des aiguilles aimantées placées dans des régions où ces météores ne sont pas visibles, nous citerons Arago (16), qui, outre ses observations propres, a réuni encore un grand nombre de faits tendant à mettre hors de doute cette influence niée par quelques personnes. Les observations recueillies jusqu'ici montrent que des aiguilles aimantées, placées à des distances très-éloignées les unes des autres, sont influencées simultanément, et que l'aurore agit lors même qu'elle ne s'élève pas au-dessus de l'horizon. En général, les perturbations, qui sont faibles quand l'aurore n'offre que des lueurs ou des plaques vagues, présentent leurs plus grands écarts quand apparaît la couronne boréale qui est formée, comme on le sait, par les rayons qui convergent vers le zénith magnétique. Ces effets tendent à prouver que l'aurore boréale a une origine électrique.

Inclinaison et ses variations. Les observations d'inclinaison ont occupé les voyageurs non moins que celles de la déclinaison; aussi en trouve-t-on un grand nombre dans les relations qu'ils ont publiées.

En étudiant la marche de l'inclinaison, en partant de Paris et se rendant vers le nord, on trouve que le pôle austral de l'aiguille s'abaisse de plus en plus au-dessous de l'horizon; que l'inclinaison augmente en même temps que la latitude, et que dans les régions polaires il existe des points où elle est de 90°.

En se dirigeant au contraire dans l'hémisphère austral, on a reconnu que l'inclinaison diminue avec la latitude, et qu'il existe, non loin de l'équateur, des points où l'aiguille est sans inclinaison. Au delà de ces points, l'inclinaison recommence, mais dans un sens inverse, et continue à augmenter jusque vers le pôle, où elle est de 90°. La courbe qui comprend tous les points où l'aiguille aimantée est sans inclinaison a été nommée *équateur magnétique*, et les points où l'aiguille est verticale, pôles *magnétiques*. Les observations d'inclinaison ont pour but de trouver non-seulement la position de ces derniers, mais encore celles de l'équateur (17).

L'inclinaison de l'aiguille aimantée est soumise, comme la déclinaison, à des variations continuelles que l'on a recueillies à Paris depuis 1671 jusqu'à 1829; l'inclinaison, dans cette dernière localité, a toujours été en diminuant entre ces deux époques. Il en a été de même à Londres depuis 1720.

M. Barlow, qui a essayé de calculer les inclinaisons au moyen de la formule d'après laquelle la tangente de l'inclinaison est égale au double de la tangente de la latitude magnétique, a fait plusieurs de ces déterminations qui diffèrent peu des résultats de l'observation. On considère la variation progressive qu'éprouve l'inclinaison comme la conséquence nécessaire d'un changement dans la latitude magnétique provenant des nœuds de l'équateur magnétique modifié par la forme de la courbe.

MM. de Humboldt et Arago ont essayé de calculer la diminution annuelle de l'inclinaison produite par le mouvement de l'équateur magnétique. Si l'on compare les observations de 1778 et de 1810 pour Paris, la diminution annuelle est d'environ 5', tandis que, d'après celles de 1820 à 1825, elle paraît être de 3',3 seulement. Les observations faites à Turin de 1805 à 1826 donnent 3',5, et celles de Florence 3',3. D'un autre côté, Hansteen, qui a observé les variations diurnes de l'inclinaison, a trouvé que l'inclinaison pendant l'été était d'environ 15' plus forte que pendant l'hiver, et d'environ 4 ou 5' plus grande avant midi qu'après.

Intensité et ses variations. L'intensité magnétique du globe a été l'objet de recherches, en 1722 (17'), de la part de Graham, le premier observateur auquel nous devons la découverte des variations diurnes de l'aiguille aimantée. Musschenbroek, en 1729, et Lemonnier, en 1776, puis de Saussure et Borda, se sont occupés également de cette question : ce dernier a même donné une méthode d'approximation pour la résoudre avec plus d'exactitude qu'on ne l'avait fait avant lui; mais c'est en France qu'on a eu pour la première fois l'idée de déterminer par l'observation l'intensité des forces magnétiques du globe en différents points de sa surface. Les membres de l'Académie des sciences, chargés de rédiger des instructions pour l'expédition de la Pérouse, recommandèrent d'observer la durée d'oscillation d'une aiguille d'inclinaison à des stations très-éloignées, afin d'en déduire des différences entre les intensités des forces magnétiques correspondantes à ces stations.

Les observations recueillies à cet égard ont été perdues avec l'infortuné la Pérouse. M. le capitaine Duperrey (18) a acquis néan-

moins la preuve que ces observations constatent : 1° que la force attractive de l'aimant est moindre dans les tropiques qu'en avançant vers les pôles ; 2° que l'intensité magnétique déduite du nombre des oscillations de l'aiguille de la boussole d'inclinaison change et augmente avec la latitude. Mais les instructions ont survécu et ont été mises à profit par M. de Rossel, qui accompagnait d'Entrecasteaux dans son voyage à la recherche de l'intrépide navigateur.

Les observations de M. de Rossel ont été faites de 1791 à 1794, avec une aiguille d'inclinaison dont la force avait été essayée avant le départ de l'expédition ; l'accroissement de l'intensité, en partant de l'équateur et se dirigeant vers l'un des deux pôles, est ressorti des observations faites, en 1792 et 1793, à la terre Van-Diémen et à Amboine. Les observations de M. de Rossel n'ont été publiées qu'en 1808, après que M. de Humboldt eut fait les siennes dans son célèbre voyage en Amérique, de 1798 à 1803. Il restait néanmoins encore des doutes sur le fait fondamental découvert par M. de Rossel ; mais M. de Humboldt les a levés tous en apportant de nombreuses observations à l'appui. Depuis cette époque, les physiciens et les voyageurs n'ont cessé de s'occuper de recherches relatives à la détermination de l'intensité des forces magnétiques terrestres (19).

M. de Humbold (20) s'est attaché particulièrement, dans ses observations magnétiques, à déterminer la loi suivant laquelle varie l'intensité des forces magnétiques à diverses latitudes. Il a découvert un autre fait très-important : c'est le défaut de parallélisme des lignes isodynamiques ou d'égale inclinaison. Tous ces faits ont été confirmés dans ces dernières années par les nombreuses observations faites dans les expéditions anglaises aux régions polaires et dans les voyages autour du monde par les navigateurs français.

MM. de Humboldt et Gay-Lussac (21), de 1805 à 1806, ont fait des observations sur l'intensité et l'inclinaison, pendant leur voyage en France, en Suisse, en Italie et en Allemagne, avec une aiguille horizontale suspendue à un assemblage de fils sans torsion, et une aiguille d'inclinaison ayant servi dans le voyage de d'Entrecasteaux.

Le major Sabine (22), en 1818, 1819 et 1820, a fait une série d'observations dans ses deux voyages dans la baie de Baffin et dans la mer polaire. Les capitaines Freycinet et Duperrey ont rapporté aussi de leurs expéditions un grand nombre d'observations relatives à l'intensité magnétique, ainsi que d'autres officiers de marine.

On ne s'occupe des variations de l'intensité que depuis peu d'an-

nées. Hansteen paraît être un des premiers qui ait fait des recherches sur ces variations. Les résultats obtenus l'ont conduit aux conséquences suivantes : 1° L'intensité magnétique est soumise à des variations diurnes ; 2° le minimum de cette intensité a lieu entre dix et onze heures du matin, et le maximum entre quatre et cinq heures de l'après-midi ; 3° les intensités moyennes mensuelles sont elles-mêmes variables ; 4° l'intensité moyenne, vers le solstice d'hiver, surpasse beaucoup l'intensité moyenne donnée par des jours semblablement placés relativement au solstice d'été ; 5° les variations d'intensité moyenne d'un mois à l'autre sont à leur minimum en mai et en juin, et à leur maximum vers les équinoxes.

Depuis 1836, MM. Gauss et Weber, ainsi que d'autres observateurs, se sont livrés avec un zèle infatigable à des expériences relatives à l'intensité magnétique, sur les variations diurnes auxquelles elle est soumise ; je mentionnerai aussi les travaux des deux commissions scientifiques envoyées dans le Nord en 1835, 1836, 1837 et 1838, dont l'une était composée de savants français, et l'autre de savants français et suédois.

L'action magnétique du globe s'étend dans l'espace, comme MM. Gay-Lussac et Biot l'ont constaté dans leur voyage aérostatique (23). Ils ont trouvé qu'elle décroissait, mais très-lentement, à mesure qu'on s'éloignait de la terre ; il est probable que la diminution suit la loi inverse du carré de la distance, comme les attractions magnétiques. Il y a quelques probabilités également à supposer que les astres, la lune, le soleil, etc., sont doués de la puissance magnétique. S'il en était ainsi, leur action devrait réagir sur nos aiguilles, en raison de leur distance et de leur position par rapport à la terre, et il en résulterait des variations diurnes et annuelles. Néanmoins on est loin d'attribuer à de semblables causes toutes les variations que nous observons dans la marche de l'aiguille de la boussole ; il en existe d'autres dont on ne saurait nier l'intervention.

MM. Gauss et Weber, ainsi que d'autres observateurs qui ont étudié avec le magnétomètre les variations régulières et irrégulières de l'intensité à de petits intervalles de temps, ont reconnu que des variations irrégulières, quelquefois très-considérables, se montrent à de courts intervalles, et ne sont pas moins fréquentes que dans la déclinaison.

§ III. *Des lignes magnétiques.*

Il ne suffisait pas de recueillir sur tous les points du globe des observations de déclinaison, d'inclinaison et d'intensité, il fallait encore les coordonner, les grouper ensemble, de manière à les faire servir à l'établissement d'une théorie générale du magnétisme terrestre, et à la connaissance des causes probables des phénomènes magnétiques. On y est parvenu, en partie, en construisant graphiquement des courbes qui sont le lien de toutes les observations.

Lignes d'égale déclinaison, ou isogoniques. On a construit des lignes composées des points où la déclinaison est la même, et dont on a essayé de tirer parti pour déterminer la position des pôles magnétiques; ces lignes ne peuvent avoir d'autre importance que de grouper les observations d'une manière méthodique, depuis surtout que M. le capitaine Duperrey, abandonnant les lignes d'égale déclinaison, a trouvé un moyen graphique à l'aide duquel il a déterminé la figure des méridiens magnétiques.

Hansteen a publié, en 1787, un atlas magnétique dans lequel se trouve une carte des déclinaisons renfermant la réunion d'observations la plus complète que l'on ait faite jusque-là. A la simple inspection de cette carte, on reconnaît le défaut de symétrie des courbes d'égale déclinaison; on doit en conclure que les causes dont dépend le magnétisme terrestre sont réparties inégalement. On voit encore qu'il existe deux lignes sans déclinaison : l'une, située dans l'océan Atlantique, entre l'ancien et le nouveau monde, laquelle commence sous le 60° de latitude, à l'ouest de la baie d'Hudson, s'avance, dans la direction sud-est, à travers les lacs de l'Amérique du Nord, traverse les Antilles et le cap Saint-Roch, jusqu'à ce qu'elle atteigne l'océan Atlantique du sud, où elle coupe le méridien de Greenwich par 65° latitude sud. Cette ligne est presque droite jusque près de la partie orientale de l'Amérique du Sud, où elle se courbe un peu au-dessus de l'équateur.

La seconde ligne sans déclinaison, qui est remplie d'inflexions, commence au 60° de latitude sud, au-dessous de la Nouvelle-Hollande, traverse cette île, s'étend dans l'archipel Indien, en se partageant en deux branches qui coupent trois fois l'équateur.

Cook avança aussi qu'il existait encore une troisième ligne sans déclinaison vers le point de la plus grande inflexion magnétique; mais elle n'a pas été suivie dans le nord, de sorte que l'on ne con-

naît pas son cours. Les voyageurs ont cherché aussi la série des points où ils pensaient que la déclinaison était la plus grande; Cook a trouvé une ligne de ce genre dans l'hémisphère austral, à 60° 49′ de latitude et 93° 45′ de longitude occidentale, comptés du méridien de Paris.

Outre les lignes de non-déclinaison, Hansteen en a tracé d'autres qui les suivent et dont la déclinaison est de 5°, 10°, 15°, etc. Ces dernières présentant une courbure sur elles-mêmes à leurs extrémités, il en a tiré la conséquence qu'il existe deux pôles magnétiques dans chaque hémisphère, dont l'un a une intensité plus grande que l'autre, et que ces quatre pôles ont un mouvement régulier autour des pôles terrestres, les deux pôles du nord allant de l'ouest à l'est dans une direction oblique, et les autres, de l'est à l'ouest, aussi obliquement. Les deux pôles forts, suivant Hansteen, se trouveraient aux extrémités d'un axe magnétique, et les deux faibles à celles d'un autre axe.

Depuis la publication de ce travail, Hansteen (24) a recueilli les observations faites par tous les voyageurs français et anglais qui se sont mis en garde contre les causes d'erreurs que leurs devanciers avaient négligées; ayant eu connaissance en outre des observations qui se trouvent au dépôt des cartes marines d'Angleterre, il a pu revoir les calculs qu'il avait faits pour déterminer la portion des pôles magnétiques, ainsi que le temps de leur révolution.

M. Barlow (25) a aussi repris la question des pôles magnétiques; ses recherches n'ont pas peu contribué à faire abandonner l'hypothèse de deux pôles dans chaque hémisphère. Ayant réuni les observations les plus importantes faites dans les voyages récents, et surtout dans le voisinage des pôles, il a construit une carte des lignes d'égale déclinaison, en écartant toute vue théorique. Cette carte, qui est à peu près celle de Hansteen, à part les additions nouvelles et les portions qui offrent des courbures extraordinaires, semble indiquer que les lignes d'égale déclinaison dépendent de lois qui sont encore inconnues.

M. Barlow a remarqué que les observations faites dans l'océan Indien, où il existe une ligne sans déclinaison qui coupe l'équateur magnétique, sont plus en harmonie entre elles que les observations recueillies dans les autres parties du globe, circonstance qu'il a attribuée à la faible valeur de l'inclinaison et à la forte intensité de la composante horizontale, qui expose moins celle-ci à être influencée par des attractions locales.

M. Barlow n'admet qu'un seul pôle magnétique dans chaque hémisphère, dont il a déterminé la position en supposant que les phénomènes magnétiques du globe sont les mêmes que ceux que présente une sphère de fer, et en s'appuyant sur les meilleurs observations de déclinaison et d'inclinaison faites dans diverses parties du globe.

Méridiens magnétiques. Les méridiens magnétiques, tels que les considère M. Duperrey, résultent de la direction de l'aiguille aimantée en chaque point du globe. Supposons que l'on parte d'un point quelconque, et que, cheminant toujours dans le sens de la direction de l'aiguille aimantée, d'abord vers le pôle sud, on relève tous les points par lesquels on aura passé, la courbe qui les réunira tous formera un méridien magnétique. Si l'on prend un autre point de départ voisin du premier, et que l'on trace de la même manière un méridien magnétique, ce méridien rencontrera le premier en deux points situés, l'un vers le pôle nord, l'autre vers le pôle sud. En traçant sur le globe un certain nombre de ces méridiens, et prenant les points d'intersection de deux méridiens voisins, on aura alors, dans chaque hémisphère, une courbe fermée, résultant de la réunion de tous les points d'intersection : il est naturel d'admettre que le pôle magnétique de chaque hémisphère se trouve au centre de l'aire renfermée par ces courbes.

Outre les méridiens magnétiques, M. Duperrey a tracé encore sur les mêmes cartes, des courbes normales aux méridiens, et qu'il a appelées parallèles magnétiques, en raison de leur analogie avec les parallèles terrestres.

Lignes d'égale inclinaison, ou isocliniques; équateur magnétique. Il paraît que la première carte des lignes d'égale inclinaison est celle de Wilcke (26). La même carte a été reproduite plus tard par Le Monnier, mais avec des modifications considérables. Les cartes de ce genre qui méritent d'être prises en considération sont, pour l'époque où elles ont été dressées, celles que Hansteen a publiées en 1819.

Les lignes d'égale inclinaison sont analogues aux parallèles terrestres qu'elles coupent obliquement, mais elles n'en ont pas toute la régularité, et sont d'ailleurs d'autant moins parallèles entre elles qu'elles se rapprochent davantage des régions polaires, où elles circonscrivent les pôles magnétiques de toute part. Ces pôles, qu'il ne faut pas confondre avec les centres d'action intérieurs, sont tout simplement les points de la surface où l'aiguille aimantée, sus-

pendue par son centre de gravité, prend la direction de la verticale.

Parmi les lignes d'égale inclinaison, il en est une dont les physiciens se sont plus particulièrement occupés, celle où l'inclinaison est nulle, et à laquelle on a donné le nom d'*équateur magnétique.* Wilcke en a donné une figure en 1768. MM. Hansteen et Morlet l'ont reproduite à des époques beaucoup plus récentes, en se fondant sur les nombreuses observations qu'ils ont puisées dans les voyages de Cook, d'Eckberg, de Panton, de la Pérouse, etc. On doit à M. Morlet un moyen facile de faire concourir à la détermination de cette courbe les observations voisines des lieux qu'elle parcourt : on sait que M. Biot (27), résumant toutes les actions australes et boréales de magnétisme terrestre en deux centres d'action, qu'il place à une très-petite distance du centre du globe, est arrivé à une formule à l'aide de laquelle on obtiendrait la latitude magnétique d'un point de la surface de la terre, en fonction de l'inclinaison de l'aiguille observée en ce point, si la terre était parfaitement homogène; M. Morlet a fait usage de cette formule modifiée par MM. Bowdich, Malweide et Kraft, après avoir reconnu qu'elle pouvait toujours être appliquée aux inclinaisons qui ne dépassent pas 30°, et après s'être assuré que la latitude magnétique du lieu de l'observation devait être comptée sur le méridien magnétique, et non pas sur le méridien terrestre du lieu dont il s'agit. Les résultats obtenus par MM. Hansteen et Morlet (28) se rapportent à l'équateur magnétique de 1780.

M. Duperrey (29), durant son voyage sur la corvette *la Coquille,* a fait de nombreuses observations qui l'ont mis à même de déterminer pour l'année 1824 l'équateur magnétique dans la presque totalité de son cours. *La Coquille* ayant coupé six fois cette courbe, il a été possible de déterminer directement la position de deux points d'intersection situés dans l'océan Atlantique. Dans la carte de M. Morlet, les latitudes des points de la ligne sans inclinaison qui correspondent aux mêmes longitudes sont de 1° 43′ à 1° 50′ plus au sud ; il semble résulter de là que l'équateur magnétique s'est rapproché de l'équateur terrestre d'une quantité égale : les mêmes différences se trouvent sur la carte de M. Hansteen.

Lignes isodynamiques, ou d'égale intensité. Hansteen fit paraître à Christiania, en 1826, une première carte dans laquelle se trouvent figurées des lignes d'égale intensité magnétique, qu'il a désignées sous le nom de *lignes isodynamiques ;* de nouvelles cartes,

plus complètes que la précédente, furent publiées par lui en 1832: elles renfermaient toutes les observations d'intensité magnétique depuis 1790 jusqu'en 1830.

M. Duperrey (30) a présenté en 1833 à l'Académie des sciences de nouvelles cartes, dans lesquelles les lignes isodynamiques de l'hémisphère nord sont à peu près les mêmes que celles d'Hansteen, tandis que les lignes de la zone intertropicale et de l'hémisphère sud ont éprouvé des modifications considérables. Il n'a présenté toutefois ses cartes de lignes isodynamiques qu'avec une certaine réserve; ses craintes étaient fondées sur ce que les observations d'intensité magnétiques paraissent assujetties à des erreurs dont il n'a pas encore été possible de les débarrasser d'une manière complète. M. Duperrey n'a pas admis la multiplicité de pôles magnétiques introduite dans la science par Halley, repoussée par Euler, et reproduite par Hansteen (31).

M. le major Sabine a fait, en 1838, à l'Association britannique pour l'avancement des sciences, un rapport sur les variations de l'intensité du magnétisme terrestre; ce rapport est accompagné de nouvelles cartes de lignes isodynamiques. Pour dresser ces nouvelles cartes, M. Sabine s'est fondé, comme l'avaient fait ses prédécesseurs, sur toutes les observations recueillies depuis 1790 jusqu'en 1830; mais il a pu disposer des observations du voyage de l'*Uranie*, dont M. Duperrey avait été privé, et il a ajouté à ces dernières, en outre d'observations récentes qui lui sont propres, toutes celles que MM. Quetelet, Douglas, Fitz-Roy, Estcourt, Rudberg et Lloyd venaient de faire dans différentes parties du globe.

§ IV. *Théories du magnétisme terrestre; origine probable de ce magnétisme.*

Théories du magnétisme terrestre. Gilbert est le premier qui ait supposé que la terre est un aimant puissant, dont l'axe coïncide avec l'axe terrestre. Depuis, cette hypothèse a été généralement adoptée, et si elle n'explique pas la cause du phénomène, elle sert du moins à se rendre compte des actions exercées sur l'aiguille aimantée; on l'a prise pour base des théories qui embrassent la généralité des faits observés sur toutes les parties du globe.

La plus simple des théories basées sur cette hypothèse est celle qui admet un seul aimant infiniment petit, placé au centre de

la terre, ce qui revient à supposer que les forces magnétiques sont tellement distribuées dans toute la masse de la terre, que la résultante de toutes leurs actions peut être représentée par l'action de cet aimant central infiniment petit, de même que l'attraction exercée par un globe homogène est la même que si toute sa masse était réunie à son centre.

Tobie Mayer, il y a plus de quatre-vingts ans, s'empara de cette hypothèse et la soumit au calcul; il supposa que le petit aimant coïncidait, non avec le centre de la terre, mais avec un point situé à une distance de ce centre égale au septième du rayon terrestre; il en déduisit, par le calcul, des inclinaisons et des déclinaisons qui s'accordaient avec les observations, pour un petit nombre de lieux seulement. Sa théorie était défectueuse pour toutes les autres localités.

Hansteen fit plus : il substitua à l'action magnétique de la terre celle de deux aimants, différant totalement de position et d'intensité. Mais, lorsqu'il voulut comparer sa théorie avec les observations faites en quarante-huit lieux différents, les trois éléments calculés ne s'accordèrent que six fois avec les éléments observés; il trouva même dans les inclinaisons des différences qui allaient jusqu'à 13 degrés.

M. Biot (31[1]), sans avoir connaissance des recherches analytiques de Tobie Mayer, partit de la même hypothèse que lui, et parvint à découvrir une loi entre la latitude magnétique et l'inclinaison en ce point. M. Krafft, en discutant la formule de M. Biot, a été conduit à une expression plus simple : La tangente de l'inclinaison est égale au double de la tangente de la latitude magnétique. Suivant M. Biot, cette loi a besoin d'être modifiée quand on considère les points du globe qui sont influencés par les inflexions de l'équateur magnétique. Mais alors il faudrait supposer des centres d'action dans tous les endroits du globe où la loi des tangentes est en défaut; ce qui compliquerait beaucoup la question théorique du magnétisme terrestre.

Poisson a donné une théorie mathématique du magnétisme; dont il a été question page 114, sans en faire une application directe aux effets du magnétisme terrestre. Nous devons dire qu'il a déduit de ses savants calculs la loi de M. Biot, dont nous venons de faire mention.

On doit aussi à M. Morlet des recherches analytiques sur les lois du magnétisme terrestre : il a considéré comme le moyen le plus

direct d'arriver à la solution de la question, de déterminer avec précision une des courbes où la résultante magnétique présente quelques circonstances remarquables dans sa direction à l'égard de l'horizon ou du méridien, attendu que ces courbes, portant l'empreinte des lois générales du magnétisme terrestre, peuvent servir, quand leurs équations sont données, à déterminer ces lois.

Dans un premier travail présenté à l'Académie des sciences en 1819, M. Morlet (32), en profitant des résultats obtenus par Mayer et par M. Biot, a imaginé une méthode d'interpolation à l'aide de laquelle il a déterminé l'équateur magnétique pour l'époque du voyage de Cook. Dans un autre mémoire il a appliqué sa méthode à la discussion des observations jusqu'à cette époque. Dans des travaux postérieurs il s'est attaché à déduire, des résultats qu'il avait obtenus, des lois générales et des formules à l'aide desquelles on pût représenter numériquement les observations magnétiques.

Gauss (33) a donné aussi une théorie mathématique des phénomènes magnétiques terrestres. Il fait observer que la représenation graphique des phénomènes n'est qu'un premier pas vers la solution de la grande question du magnétisme terrestre. Ce serait peu, en effet, pour un astronome d'avoir tracé l'orbite apparent d'une comète, s'il ne pouvait calculer ses éléments et prédire son retour avec toutes les particularités de son mouvement; ce serait peu de même, pour le physicien, si, connaissant la véritable cause du magnétisme terrestre, il ne pouvait assigner d'avance, jusqu'à un certain degré d'approximation, le véritable état de forces magnétiques en un point du globe à une époque quelconque. La théorie de Gauss est indépendante de toute hypothèse sur la distribution du fluide magnétique dans l'intérieur de la terre. Les premiers résultats qu'il en a déduits sont considérés par lui comme incomplets, et comme devant servir seulement à donner une idée de ceux que l'on pourra obtenir quand sa méthode analytique aura acquis toute la perfection désirable, par la comparaison d'un grand nombre d'observations faites avec soin. Sa théorie repose sur cette hypothèse fondamentale, que l'action magnétique du globe est la résultante des actions de toutes les parties magnétiques renfermées dans sa masse; qu'un aimant naturel est un corps dans lequel les deux fluides sont séparés; que les attractions et les répulsions magnétiques s'exercent en raison inverse du carré de la distance. On arriverait aux mêmes résultats analytiques si l'on substituait à cette

hypothèse celle d'Ampère, qui consiste à regarder les forces magnétiques existantes dans un aimant comme dues à des courants électriques circulant autour des molécules, dans des plans perpendiculaires à l'axe de ces aimants. On pourrait même, si l'on voulait, adopter une hypothèse mixte, et considérer les forces magnétiques terrestres comme produites en partie par la séparation des fluides magnétiques, en partie par des courants, attendu qu'il est toujours possible de substituer à un courant donné une certaine quantité de fluides séparés, distribués sur une surface déterminée, et qui produisent sur tous les points environnants le même effet que ce courant aurait pu faire naître.

Dans un grand nombre de cas, la différence entre le calcul et l'expérience est comparable aux erreurs d'observation. Elle est même quelquefois inférieure à la différence qui existe entre les observations faites dans un même lieu par deux expérimentateurs exercés ; de sorte que la théorie, que l'on parviendra sans doute à simplifier, est déjà une expression assez exacte des faits.

Origine probable du magnétisme terrestre. La grande découverte d'Œrsted, en faisant connaître un nouveau procédé d'aimantation, a fourni de nouvelles lumières pour avancer la théorie du magnétisme terrestre. En effet, aussitôt que M. Barlow (34) en eut connaissance, il s'attacha à prouver que le magnétisme terrestre pourrait bien avoir une origine électrique, c'est-à-dire être attribué à l'action de courants électriques circulant autour du globe, comme Ampère l'avait précédemment supposé.

Ayant prouvé que le pouvoir magnétique d'une sphère de fer réside seulement à sa surface, il conçut l'idée de distribuer sur la surface du globe artificiel une série de courants électriques disposés de manière à ce que leur action tangentielle pût donner partout à l'aiguille une direction correspondante ; l'expérience vint confirmer ses prévisions : ce globe produisit sur une aiguille aimantée, soustraite à l'influence terrestre et placée dans diverses positions, le même genre d'action que la terre lui imprimait dans des positions analogues.

M. Barlow ne s'est pas dissimulé les difficultés que l'on rencontre pour expliquer l'existence de courants électriques à la surface de la terre ; mettant de côté les courants qui ont une origine voltaïque dont la production serait difficile à concevoir, il a donné la préférence aux courants thermo-électriques dus à l'influence solaire. Si la chaleur solaire pouvait produire des courants dans les matières qui

forment la couche superficielle du globe, toutes les difficultés seraient levées ; mais jusqu'ici on n'a rien pu découvrir de certain à cet égard. Il en est de même de l'existence des courants hydro-électriques.

La difficulté a été la même quand on a voulu établir que le magnétisme terrestre provenait de la différence de température entre le noyau central de la terre et la croûte superficielle, qui est dans un état de refroidissement.

On ne saurait disconvenir que les variations diurnes et annuelles de l'aiguille aimantée ne soient dues à la présence du soleil au-dessus de l'horizon : dès lors on est porté à croire que toutes les parties matérielles de la terre sont douées de magnétisme, et que ce magnétisme éprouve des variations, selon que ces parties participent aux influences calorifiques de l'atmosphère, par suite de la présence ou de l'absence du soleil au-dessus de l'horizon. Nous savons, en effet, que la chaleur modifie le magnétisme des métaux qui en sont doués; que le refroidissement augmente son intensité, tandis que l'échauffement la diminue ; or, comme toutes les parties de la terre paraissent posséder un magnétique propre, on peut supposer raisonnablement que ce magnétisme subit les mêmes modifications que les corps conducteurs par l'effet de l'échauffement et du refroidissement dus à la présence ou à l'absence du soleil, de sorte que les effets peuvent être les mêmes que s'il existait des courants thermo-électriques à la surface du globe.

En résumé, on voit que, dans la plus grande partie des observatoires magnétiques de l'Europe, on s'attache à faire non-seulement des observations journalières, mais encore des observations non interrompues à certaines époques convenues de l'année, afin de saisir les circonstances locales qui peuvent exercer une influence sur les variations de la déclinaison, de l'inclinaison et de l'intensité. Il ne suffit pas de multiplier les observations, il faut encore les coordonner, faire des travaux d'ensemble, à l'exemple de MM. Hansteen, Barlow, Duperrey, Quetelet, Gauss, Sabine, Lamont, etc., afin d'arriver, s'il est possible, à la théorie générale du magnétisme terrestre.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE VI.

(1) *Savants étrangers à l'Académie des sciences de l'Institut*, t. II, p. 198.— Becquerel, *Traité du magnétisme*, p. 95.

(2) *Annales de chimie et de physique*, t. XXXVI, p. 50.

(3) *Idem*, t. LIII, p. 248. — *Traité expérimental d'électricité et de magnétisme*, t. II, p. 322-328.

(4) Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 11 et suiv.

(5) *Resultats aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins, im Jahre* 1836. *Herausgegeben von Gauss und W. Weber.* — Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre.*

(6) Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 119.

(7) *Idem*, p. 125.

(8) *Essay on magnetic attraction*, 1833.

(9) *Connaissance des temps pour* 1840. — *Relation du voyage en Islande et au Groenland sur la corvette* la Recherche, t. I, 2e part. — Becquerel, *Traité du magnétisme*, p. 147.

(10) *Trans. phil.* (1821).

(11) Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 156.

(12) *Traité du magnétisme terrestre*, p. 71.

(13) *Intensitas vis magneticæ terrestris ad mensuram absolutam revocata*, Gœttingue, 1883 — Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 74 et suiv.

(14) *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 1857.

(14¹) *Philos. trans.*, 1796.

(15) Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 173.

(16) *Annales de chimie et de physique*, 1re série, t. XXX, p. 623. t. 39, p. 369.

(17) Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 306.

(17¹) *Lois du magnétisme*, par Lemonier. *Introduction*, p. 29.

(18) Copie d'une *Lettre de Paul Lamanon au marquis de Condorcet*, que possède M. Duperrey.

(19) Le major Sabine, *Seventh report of the British Association for the advencement of science.* Londres, 1834.

(20) *Voyage de MM. de Humboldt et Bonpland*, 1re part., relation historique, t. III, p. 615.

(21) *Mémoires de la société d'Arcueil*, t. I.

(22) *Phil. trans.*, 1818. — *Appendice du voyage du major Sabine, et relation intitulée* Pendulum, etc., 1825.

(23) *Annales de chimie*, t. LII, p. 75.

(24) Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 381.

(25) *Trans. philos.* (1833).

(26) *Mémoires de l'Académie des sciences de Stockholm* (1768).

(27) Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 390.

(28) *Annales de chimie et de physique*, t. XXX, p. 348.

(29) *Idem.*

(30) Becquerel, *Magnétisme terrestre*, p. 420.

(31) *Idem*, p. 423, — *Mémoire communiqué à l'Académie des sciences en* 1833.

(31¹) Biot, *Traité de phys*, en 2 volumes, t. II, p. 97 et suiv.

(32) *Mémoires des savants étrangers de l'Académie des sciences*, t. III, p. 132.

(33) Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 494.

(34) *Philosoph. trans.*, 1831, p. 99.

CHAPITRE VII.

Dégagement de l'électricité, principalement depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle.

---

§ I. *Dégagement de l'électricité dans les actions mécaniques.*

Frottement. Les effets électriques de frottement, à peu près les seuls que l'on ait étudiés dans le siècle dernier avant la découverte de la pile, ont été depuis le sujet de recherches qui ont précisé beaucoup mieux qu'on ne l'avait fait auparavant, les conditions nécessaires à leur production; mais la quantité d'électricité qui devient libre étant bien faible, si on la compare à celle que produisent les actions chimiques, il en résulte que l'on a abandonné assez généralement cette source d'électricité, si ce n'est pour rechercher les lois et les effets de l'électricité de tension.

Canton (1) étudia le premier d'une manière spéciale les effets électriques dans le frottement de deux corps l'un contre l'autre, et montra que l'électrisation dépendait de l'état du corps frotté et du frottoir; Wilson (2), qui fit des observations du même genre, en tira cette conclusion importante, que, lorsqu'on frotte deux corps, le plus mou prend l'électricité négative. Wilke (2') observa également les effets électriques qui résultent du frottement de deux corps. D'un autre côté, Symmer (3), en 1759, avait trouvé qu'en frottant l'un contre l'autre deux rubans de taffetas, l'un blanc, l'autre noir, le premier prenait l'électricité positive, le second l'électricité négative; mais Cigna (4), qui s'occupa du même sujet, fit des expériences plus complètes en variant l'état de la surface des rubans de soie frottés et la manière dont le frottement était exercé. Depuis cette époque plusieurs physiciens, et notamment Coulomb (5), se sont occupés de ce mode d'électrisation : ce physicien, en frottant en croix l'un contre l'autre deux rubans de soie blancs pris dans la même pièce,

observa que celui qui était frotté transversalement et dont les parties éprouvaient un frottement plus considérable, prenait l'électricité négative, l'autre l'électricité positive. Il a pu déduire de ses expériences une conclusion analogue à celle tirée par Wilson, savoir, que, lorsque l'on frotte deux corps semblables l'un contre l'autre, celui qui s'échauffe le plus a une tendance à devenir négatif, et qu'en général les corps dont les molécules peuvent vibrer plus facilement ont une aptitude marquée à prendre l'électricité négative.

M. Becquerel, qui a repris depuis les expériences de Coulomb, les a étendues, et est arrivé à la même conséquence.

Il s'introduit quelquefois dans les expériences de frottement une cause d'erreur qui a été signalée par M. Delarive (6), et dont les expérimentateurs n'avaient pas tenu compte : lorsqu'on frotte l'un contre l'autre deux corps qui n'ont pas le même degré de dureté, l'un d'eux cède à l'autre une partie de sa substance, de sorte que, peu d'instants après, le frottement ne s'exerce plus entre deux corps différents, mais bien entre le corps le plus mou et la portion de ce corps qui a été déposée sur le plus dur. Les effets électriques sont alors complexes; c'est ce que M. Delarive a bien expliqué.

Les métaux, comme les corps non conducteurs, peuvent donner des effets électriques par leur frottement mutuel, soit des effets électriques de tension, soit des effets de courant appréciables à l'aide d'un multiplicateur. M. Becquerel (7), auquel sont dues ces recherches, pour trouver les effets de tension, projette l'un des deux métaux réduit en limailles sur une lame de métal tenue à la main, et recueille cette limaille sur un plateau de métal en communication avec un électroscope. Pour augmenter les effets, il imprime un mouvement rapide de rotation au disque de métal sur lequel la limaille est projetée. Il a trouvé, en opérant avec un grand nombre de substances, que les métaux ont une tendance d'autant plus grande à prendre l'électricité négative que la limaille est plus fine, que la température est plus élevée, et par conséquent que les particules des corps sont plus élastiques et peuvent vibrer plus facilement. Cependant les limailles des métaux oxydables et ces mêmes métaux sont positifs par rapport aux autres métaux.

M. Becquerel a également montré que, lorsque les métaux sont en lames, il suffit de mettre deux de ces lames en rapport avec un multiplicateur à fil court, et de les frotter légèrement l'une contre l'autre pour obtenir un courant; on forme alors un tableau, dans lequel les métaux les plus électro-négatifs sont en tête, et les

métaux plus électro-positifs à la fin. A l'inspection de ce tableau, on reconnaît que la plupart des substances qui jouissent à peu près des mêmes propriétés physiques ou chimiques sont placées à côté les unes des autres.

L'effet produit est-il dû à la chaleur dégagée ou au simple ébranlement des molécules? Il est possible que l'effet soit dû à la seconde cause, car en général, un ébranlement moléculaire communiqué à un corps ne peut donner lieu qu'à une seule somme d'action qui se retrouve, soit en chaleur, soit en électricité, en sorte que, si l'un des effets physiques domine, l'autre naturellement est moins appréciable.

Peltier (8) a observé que le plus léger dérangement dans la position d'équilibre de quelques-unes des molécules d'un circuit métallique suffit pour déterminer la production d'un courant. Peut-être doit-on rapporter à cette cause l'effet observé par M. Sullivan (9), et qui consiste en ce que l'on peut obtenir un courant électrique dans un circuit fermé, où se trouve un fil de laiton et un fil de fer soudés par un de leurs bouts, en faisant vibrer l'un des deux fils, de manière à produire un son. Erman a annoncé également que dans des couples thermo-électriques, dont on parlera dans le paragraphe suivant, si l'on exerce un frottement aux points de contact, on obtient un courant électrique, comme en chauffant la surface de jonction, même lorsque la température du circuit est déjà élevée.

Les corps réduits en poussière sont capables de s'électriser par leur frottement mutuel, comme cela se voit dans l'expérience où l'on produit les figures dites de Lichtemberg, ou figures électriques; on projette pour cela, à l'aide d'un souflet, un mélange de soufre et de minium réduits en poussière sur un gâteau de résine sur la surface duquel on a promené les deux garnitures d'une bouteille de Leyde préalablement chargée : les deux corps se séparent; le soufre, électrisé négativement, se transporte sur les parties touchées par la garniture chargée d'électricité positive, qui deviennent jaunes ; le minium électrisé positivement laisse une trace rouge sur celles qui se trouvent chargés négativement.

Cette expérience curieuse n'a pas été faite sous cette forme par Lichtemberg; ce physicien, en 1777 (10), observa seulement que des poussières isolées, telles que la résine, se fixaient sur les parties électrisées à la surface de corps non conducteurs; Deluc montra que des poussières métalliques projetées au travers d'étoffes se fixaient de la même manière ; mais c'est en 1788 (11) que M. de Villarsy

communiquait au mécanicien Bienvenu le moyen de colorer les figures en se servant d'un mélange de minium et de soufre projetés simultanément, substances qui se portaient chacune sur les parties électrisées différemment, comme on l'a dit plus haut. Depuis, ce sujet a attiré l'attention d'un certain nombre de physiciens, principalement en vue de manifester la production de figures par la manière dont les parties inégalement électrisées à la surface des corps non conducteurs condensent ou fixent les vapeurs et les poussières, et l'on a vu (page 88) que M. Riess en a fait usage pour trouver le sens de la décharge induite dans la production des courants induits. Depuis cette époque, M. Boettger (12) a varié les couleurs des figures que l'on peut obtenir par le mélange de deux corps en poussière que l'on projette sur des gâteaux de résine différemment colorés et sur lesquels on a tracé des figures dont les parties sont différemment électrisées.

Les gaz mélangés de gouttelettes d'eau sont capables de manifester des effets analogues ; si l'on a observé depuis longtemps que le gaz, en frappant rapidement un verre à vitre très-sec, le rendent électrique, cet effet n'a lieu qu'autant que le gaz est humide ou emporte avec lui des gouttelettes d'humidité ou des poussières très-ténues.

C'est à une action du même genre que l'on doit rapporter les puissants effets produits par la vapeur mêlée de gouttelettes d'eau en sortant d'une chaudière. Le fait a été observé pour la première fois par M. Armstrong (13) en 1840, dans l'usine de Sigdille, près de Newcastle : il vit, non sans étonnement, qu'un jet de vapeur, en sortant d'une chaudière à vapeur, produisait un dégagement d'électricité quelquefois très-considérable, et même plus fort que celui que l'on obtenait avec les machines électriques ordinaires. On a disposé depuis des chaudières dont les effets sont très-énergiques, en les isolant convenablement à l'aide de pieds en verre, recevant la vapeur sur des conducteurs également isolés, et en élevant la pression intérieure jusqu'à 8 à 10 atmosphères. Dans cette action, la vapeur emporte l'électricité positive, et la chaudière retient l'électricité négative. L'électricité est produite par le frottement de la vapeur humide contre les parois de l'orifice, et les effets sont augmentés en disposant l'orifice de façon que le frottement ait lieu contre du bois dur, tel que du buis, et que la vapeur, avant de sortir, se refroidisse de façon à présenter un mélange de gouttelettes d'eau. Les phénomènes électriques manifestés dans ces circonstances sont les plus grands effets de tension que

l'on ait obtenus jusqu'ici avec des machines électriques. M. Faraday (14) a montré que l'on obtenait des effets du même genre en substituant au courant de vapeur un courant d'air mêlé de poudres sèches.

Canton (15), qui a étudié avec soin les effets électriques résultant du frottement de deux corps, a montré qu'en frottant les tubes et les globes de verre des machines électriques, à l'aide d'amalgames de métaux altérables, on provoquait un plus grand dégagement d'électricité qu'avec d'autres matières placées sur les frottoirs ; c'est le premier physicien qui paraît avoir employé les amalgames comme substances excitatrices. Depuis, presque tous les physiciens en ont fait usage, non-seulement avec les anciens appareils, mais encore avec les machines à plateau de verres employées pour la première fois par Ramsden (16).

Wollaston (17) avait avancé que les amalgames n'agissaient en général que par l'oxydation que provoque le frottement dans l'air. Mais Gay-Lussac (18) a démontré que l'absence d'électricité dans les circonstances où Wollaston avait opéré était due à la présence de l'eau hygrométrique, contre laquelle il ne s'était pas mis en garde. M. Péclet, qui a opéré successivement dans l'air, l'hydrogène et le gaz acide carbonique bien secs, en a déduit la même conséquence.

M. Edmond Becquerel (19) est arrivé à des conclusions analogues, en prouvant que, dans le frottement des plateaux de verre des machines ordinaires contre les différentes matières dont on enduit les coussins, il se produisait des effets électriques dépendant de l'état moléculaire des corps frottés, et non des modifications chimiques que ces corps subissaient ; ainsi du charbon en poudre, des substances telles que du talc, de la plombagine et d'autres matières, donnent des effets électriques bien marqués, et dans ce cas l'on ne peut invoquer une autre cause pour le dégagement d'électricité qu'un ébranlement moléculaire.

En général les liquides ne permettent pas d'obtenir des effets électriques de tension dans leur frottement contre les solides, car ils mouillent la surface de ceux-ci, et le frottement s'exécute alors entre deux corps de même nature. Cependant, avec le mercure, qui ne mouille pas la plupart des substances, on obtient un dégagement d'électricité ; l'emploi des amalgames le prouve, ainsi que l'expérience du baromètre lumineux d'Hauksbée (20). (Voir page 4.) C'est Ludolf le jeune (21) en 1744, puis Alaman (22), qui prouvèrent

que l'effet lumineux dans cette dernière expérience était dû au dégagement d'électricité produit par le frottement de mercure. Depuis, les travaux de Nollet, ceux de Dessaignes (23) et de M. Perego (23'), ont parfaitement spécifié les diverses conditions physiques nécessaires à la production de l'électricité dans cette circonstance.

On peut observer la production de courants électriques dans le frottement des liquides autres que le mercure. M. E. Becquerel (24) a étudié d'une manière spéciale ces courants qui se manifestent entre les lames métalliques et les liquides lorsqu'il y a mouvement relatif entre eux. Il est parvenu à prouver que dans une foule de circonstances il se produit des effets dus à une action mécanique, n'ayant aucune origine chimique; tel est le frottement du platine, de l'or et du charbon sur des liquides qui ne les attaquent pas; ces substances, et au plus haut degré le charbon, prennent l'électricité négative et laissent la positive au liquide. Les métaux altérables, et en tête desquels on doit placer le zinc et le fer, donnent des actions du même genre, mais prennent l'électricité positive dans le mouvement relatif qui a lieu entre eux et le liquide. On peut citer à ce sujet cette expérience curieuse dans laquelle on peut former un élément de pile voltaïque avec deux lames de zinc, dont l'une est en mouvement dans un liquide conducteur et l'autre en repos; celle qui est en mouvement prend l'électricité positive. Si le liquide est remplacé par une pâte faite avec du charbon de cornue bien pulvérisé, le courant électrique développé est énergique. Si, les lames étant en repos, le liquide est en mouvement, les effets sont les mêmes.

On doit ranger parmi les effets dus aux actions mécaniques les effets électriques qui se manifestent lorsque des gaz se dégagent des liquides ou des corps organisés. M. Becquerel (25), dans un Mémoire communiqué à l'Académie des sciences en 1856, a montré que, lorsque des gaz se dégageaient, il y avait frottement contre les liquides, et par suite dégagement d'électricité. C'est probablement à cette cause que l'on doit rapporter les effets obtenus par Lavoisier, Laplace et de Desaussure, cités page 13, et considérés par eux comme des effets d'électricité dus aux actions chimiques.

M. Becquerel a encore observé les faits suivants : Lorsque l'on projette dans une capsule de platine, parfaitement propre et suffisamment chauffée, quelques gouttes d'eau distillée, de manière à ce que l'évaporation soit immédiate, la capsule devient négative, et la vapeur recueillie est positive. Cet effet, qui est beaucoup plus

fort que celui qui se produit dans les actions chimiques, puisqu'il est sensible à l'électroscope sans l'intermédiaire du condensateur, est dû au frottement de la vapeur mêlée de gouttelettes d'eau sur les parois du vase de platine. Avec les acides nitrique, chlorhydrique, les effets sont les mêmes; avec l'ammoniaque, les effets sont inverses; avec de l'eau contenant un acide ou un alcali, les effets sont variables, comme il est facile de le concevoir. Ces faits, comme on le verra plus loin, sont du même ordre que ceux qui avaient été observés antérieurement par MM. Pouillet et Peltier, lors de la déshydratation des sels.

Une capsule de zinc contenant de l'eau acidulée au $\frac{1}{20}$, et dont on a élevé la température jusqu'à l'ébullition, devient au contraire positive au lieu d'être négative, comme l'indiquerait l'action chimique produite; mais, dans ce cas-ci, il y a effet électro-chimique et effet de frottement, et ce dernier est plus considérable, étant provoqué par le dégagement du gaz hydrogène, comme on le démontre directement : c'est ce dégagement qui rend la capsule positive.

Le gaz acide carbonique, en s'échappant d'un liquide, est au contraire positif, ainsi que l'oxygène. On voit par là que ces gaz, en se dégageant de l'eau, rendent celle-ci négative.

L'oxygène qui se dégage des feuilles des végétaux sous l'influence de la lumière, ainsi que le gaz acide carbonique à la sortie des feuilles pendant la nuit, en vertu de la même cause, doivent emporter un excès d'électricité positive. L'hydrogène protocarboné, en se dégageant des eaux où se trouvent des matières organiques en décomposition, possède au contraire un excès d'électricité négative. Ces effets, qui sont mécaniques, doivent intervenir dans les phénomènes électriques de l'atmosphère.

Pression. Œpinus (26) avait dit qu'en pressant deux plaques de verre elles s'électrisaient, l'une positivement, l'autre négativement. Mais le dégagement de l'électricité, dans cette circonstance, n'a été étudié que depuis l'expérience suivante de Libes (27); ce physicien observa qu'en posant avec pression sur un plateau de bois recouvert de taffetas gommé enduit d'une couche de résine élastique, un disque de laiton isolé, ce disque, en l'enlevant, était électrisé négativement, tandis qu'un effet contraire avait lieu en pressant le disque avec frottement. Haüy (28) trouva ensuite qu'un cristal de spath d'Islande jouissait de la propriété d'acquérir un fort excès d'électricité positive par la simple pression entre les doigts.

Ces effets n'étaient pas particuliers à ces substances; M. Becque-

rel (29), dans deux mémoires, dont le premier a été lu à l'Académie des sciences le 20 mars 1820, a démontré qu'ils dependaient de propriétés générales que l'on peut énoncer de la manière suivante : 1° Si deux corps de nature quelconque et isolés, l'un d'eux étant un mauvais conducteur, sont pressés l'un contre l'autre, ils sortent, chacun, de la compression avec un excès d'électricité contraire; la chaleur favorise la production du phénomène; 2° en opérant avec deux portions semblables d'un même corps, la plus légère différence de température suffit pour provoquer le dégagement d'électricité par pression sans frottement; la surface la plus chaude est négative.

A l'aide d'une balance électrique de torsion très-sensible pourvue de divers accessoires, M. Becquerel a trouvé, toutes choses égales d'ailleurs, que, pour de faibles pressions et la même vitesse de séparation des corps, la tension de l'électricité croît comme la pression.

M. Péclet (30) a étudié les effets de la pression avec une machine électrique construite de telle manière qu'il pouvait observer l'influence du temps, celle de la vitesse et de la pression sur le dégagement de l'électricité. De ses expériences il a déduit les conséquences suivantes : 1° La vitesse et la pression étant constantes, la tension finit par le devenir; 2° en général, la tension est indépendante de la vitesse; 3° au delà d'une certaine limite, la pression n'influe plus sur l'électricité dégagée. M. Péclet, dans ses expériences, a fait abstraction de l'électricité qui se recombine au contact, quand on ne met aucun obstacle à la recomposition. En général, on ne doit jamais perdre de vue dans les effets électriques de pression et de frottement les considérations suivantes : 1° Lorsque la décomposition des deux électricités s'effectue plus rapidement que la recomposition, la tension électrique augmente; 2° si la recomposition se fait dans un temps appréciable, plus on tournera vite la roue de la machine, plus la tension maximum augmentera. Quant à l'influence de la pression, elle n'est sensible, comme l'a montré M. Becquerel, que lorsque la vitesse avec laquelle on sépare les corps frottés est suffisante pour s'opposer à la recomposition d'une portion de l'électricité dégagée pendant que la pression primitive passe par les pressions intermédiaires.

Clivage. M. Becquerel a établi un rapprochement entre les effets électriques de pression et ceux que présente le clivage des substances minérales cristallisées, telles que le mica, le talc, la chaux sulfatée, etc. En clivant rapidement une lame de mica dans l'obscurité,

on aperçoit une faible lueur phosphorique, en même temps que chaque partie séparée emporte avec elle un excès d'électricité contraire. Les deux mêmes lames rapprochées l'une de l'autre et pressées jusqu'à les faire adhérer légèrement, puis séparées rapidement, produisent les mêmes effets. Cette faculté se perd peu de temps après.

M. Becquerel a conclu de ses recherches que toutes les fois que l'on sépare deux corps en contact adhérant l'un à l'autre par la force de cohésion ou toute autre cause, ces deux corps possèdent toujours un excès d'électricité contraire. Il a rapporté à cette cause les phénomènes lumineux produits dans les mers polaires quand des blocs de glace viennent à se heurter.

Il faut rapporter aux effets électriques de clivage, et par suite à la désagrégation, les effets observés par Gray en 1733 (31) dans la solidification de certaines substances fondues, telles que le soufre, la résine, et ceux que l'on obtient avec le chocolat, l'acide phosphorique, etc., quand on les sépare des vases de verre où les matières ont été coulées ; le vase prend une électricité, et la matière l'autre. Kinnerstley étudia plus tard les mêmes effets, mais principalement Wilke et ensuite Œpinus (32). Peut-être faut-il y rapporter encore les effets de phosphorescence observés par M. Henry Rose (33) dans la cristallisation de l'acide arsenieux, et dans celle des sulfates de soude et de potasse.

§ II. *Dégagement de l'électricité dans les actions physiques.*

Les principales actions physiques qui dégagent de l'électricité sont la chaleur, et l'induction produite, soit par l'électricité, soit par les aimants : ce dernier sujet ayant déjà été traité, nous n'y reviendrons pas ; d'un autre côté, on a prouvé que le changement d'état des corps ne donnait lieu à aucun phénomène électrique ; quant aux effets qui résultent des actions capillaires et étudiés par M. Becquerel (34), ils indiquent seulement que dans cette action moléculaire, comme lorsque l'équilibre des corps est troublé et qu'il y a travail produit, il y a manifestation d'effet électrique ou de la chaleur. Dans ce paragraphe, il ne sera donc question que du dégagement de l'électricité par l'action de la chaleur.

Cristaux pyro électriques. On a vu page 11 que la tourmaline jouissait de la propriété d'être électrique par élévation ou abaissement de température ; d'autres substances possèdent également

cette faculté, entre autres la topaze (35), le zinc oxydé (36), la boracite (37), la phrénite (38), la mésotype, le sphène, l'axinite, dont les cristaux, suivant Haüy, dérogent à la loi de symétrie, c'est-à-dire qui présentent cette particularité que les parties opposées correspondantes ne sont pas semblables; le sommet qui a le plus de facettes est positif par refroidissement.

M. Becquerel (39) a disposé un appareil avec lequel il a déterminé, à l'aide de la formule de pendule, les intensités électriques polaires successives d'une tourmaline oscillant librement entre les pôles contraires de deux piles sèches. Les observations recueillies montrent que l'intensité de l'électricité n'est pas en raison directe des variations de température, mais suit une loi très-complexe qui dépend particulièrement du pouvoir conducteur du minéral.

MM. Riess et G. Rose (40) ont montré que, dans la plupart des cristaux pyro-électriques, il n'y a qu'un seul axe électrique, qui ne se confond pas toujours avec l'axe de cristallisation; mais il existe des cristaux qui ont plusieurs axes; l'axinite en a deux distincts des axes de cristallisation. La boracite, qui cristallise en cubes, a quatre axes électriques se confondant avec les quatre axes du cristal. Le docteur Hankel a annoncé que cette substance possédait trois autres axes se confondant avec ceux du cube : cette substance aurait donc aussi des pôles aux centres des faces; ce fait a été vérifié par MM. Riess et G. Roze.

M. Gaugain (40') a étudié les propriétés électriques de la tourmaline en mettant en communication l'une des extrémités du cristal avec un électroscope, l'autre avec le sol; il a obtenu pendant le refroidissement une quantité d'électricité plus considérable que celle que l'on avait obtenue jusqu'ici. En formant des piles de quantité, c'est-à-dire en réunissant un certain nombre de tourmalines par les pôles de même nom, il a pu condenser assez d'électricité sur un condensateur pour donner de petites étincelles. Contrairement aux observations faites avec des tourmalines isolées, il a reconnu que dans les échantillons de même teinte, les plus limpides et les plus volumineux étaient ceux qui donnaient le plus d'électricité.

On s'est demandé d'où provenait le dégagement d'électricité dans les cristaux pyro-électriques? M. Becquerel a émis l'opinion qu'il s'opérait par l'action de la chaleur une dilatation, un clivage naturel qui dégage de l'électricité, comme cela a lieu quand on clive

une lame de mica. Il se passerait donc là un phénomène semblable à celui que nous offrent les piles électriques formées par des condensateurs placés à la suite l'un de l'autre.

Courants thermo-électriques. Les circuits métalliques donnent aussi lieu à des phénomènes électriques quand la température n'est pas la même dans toutes les parties. M. Seebeck a découvert ces effets en 1823 (41) en montrant que, dans un circuit composé d'un barreau de bismuth et d'une lame de cuivre soudés bout à bout, si l'on chauffe l'une des soudures, il se produit aussitôt un courant électrique allant du bismuth au cuivre; avec l'antimoine et le cuivre, le courant est dirigé en sens contraire.

M. Yélin (42) montra qu'il suffisait de chauffer l'une des extrémités d'un barreau pour produire un courant, et que l'effet dépendait de leur forme et de la manière dont toutes les parties avaient été refroidies. M. Sturgeon (43) obtint des résultats plus précis encore avec des barreaux cylindriques ou coniques de bismuth ou d'antimoine. En chauffant uniformément l'une des extrémités d'un cylindre d'antimoine, il a constaté l'existence de deux lignes neutres dont il a déterminé la position.

M. Becquerel (44), dans plusieurs mémoires, a analysé les phénomènes thermo-électriques dans les circuits métalliques simples ou composés, en commençant par voir ce qui se passait dans un circuit où l'on ne pouvait supposer des défauts d'homogénéité provenant de la cristallisation ou de l'écrouissage. Un fil de platine, dont les deux bouts n'ont pas la même température, devient un couple voltaïque quand on les superpose l'un sur l'autre; le bout le plus chaud est négatif. On est porté à croire que le dégagement d'électricité est ici le résultat d'un mouvement moléculaire pendant la propagation de la chaleur.

M. Becquerel a fait une autre expérience qui conduit à la même conséquence : ayant fait un nœud dans un fil de platine formant un circuit fermé, il a montré qu'en chauffant à droite ou à gauche de ce nœud, il se produisait un courant allant de la partie chaude à la partie froide. Les effets sont encore les mêmes en coupant le fil en deux, superposant les deux bouts l'un sur l'autre et chauffant d'un côté ou de l'autre. M. Becquerel a inféré de là que lorsque la chaleur se propage dans une barre de métal, il s'opère une suite de décompositions et de recompositions d'électricité naturelle qui accompagnent la propagation de la chaleur; celle-ci rencontre-t-elle un obstacle, là où il existe il y a séparation des deux électricités.

Avec les métaux oxydables les effets sont complexes, vu l'intervention de l'action chimique.

M. Becquerel, en composant des circuits avec différents métaux, a formé un tableau dans lequel ces derniers sont rangés suivant leur pouvoir thermo-électrique, les plus électro-négatifs étant en tête. Ce tableau est le même que celui des pouvoirs électriques de frottement des métaux; on a vu (page 146) que, dans ce dernier cas, il était probable que l'effet était dû à l'ébranlement des molécules. Le pouvoir thermo-électrique d'un métal est la faculté qu'il possède de produire une certaine quantité d'électricité dans son contact avec un autre métal, à une température donnée; M. Becquerel a fait connaître une méthode pour le déterminer.

Les expériences de M. Becquerel l'ont conduit aux conséquences suivantes : 1° La chaleur spécifique, et probablement le pouvoir conducteur, interviennent dans la production des phénomènes thermo-électriques

2° L'intensité du courant, quand deux soudures contiguës n'ont pas la même température, est égale à la différence des intensités du courant produit, quand on porte successivement chacune de ces soudures à l'une des deux températures, l'autre étant à zéro, et non à l'intensité du courant résultant de la différence des températures des deux soudures.

3° L'effet est le même, que les métaux soient en contact immédiat ou bien séparés par un conducteur quelconque.

4° Dans la plupart des cas, l'intensité du courant ne croît proportionnellement à la température que jusqu'à 100°.

5° Dans différents circuits, notamment dans ceux de fer et d'argent, de zinc et d'argent ou d'or, les effets thermo-électriques changent au moins une fois de signe en élevant la température.

6° Pour des différences de température qui ne dépassent pas 20°, on détermine l'intensité du courant en prenant la différence des pouvoirs thermo-électriques des métaux en contact.

Des recherches plus récentes ont été faites sur les rapports existant entre la thermo-électricité et la structure intérieure des corps, recherches qui ont jeté quelque jour sur cet intéressant sujet.

M. Matteucci (45) a démontré que le contact du mercure froid et du mercure chaud ne troublait pas l'équilibre des forces électriques. Il en est de même du bismuth fondu à l'égard du bismuth solide. Ces faits ont été confirmés par plusieurs physiciens.

M. Magnus (46), qui a vérifié la non-production des courants

thermo-électriques dans cette circonstance, et en s'appuyant également sur d'autres faits, a cherché à prouver, contrairement à l'opinion de M. Becquerel, énoncée plus haut, que dans l'inégale propagation de la chaleur dans un métal homogène, il ne saurait y avoir développement d'électricité. Il a annoncé que dans les circuits homogènes, mais formés de fils d'inégal diamètre ou contournés, les effets électriques qui peuvent se manifester sont dus à une différence dans l'écrouissage ou la dureté des parties contiguës. Peltier avait déjà montré, bien avant M. Magnus, qu'une différence dans l'écrouissage était une cause de production d'effets thermo-électriques; mais cela n'infirme pas les effets cités plus haut et observés avec des fils de platine ou d'or coupés et posés en croix l'un sur l'autre; l'explication de M. Becquerel est encore la plus simple. Quant aux effets négatifs que présentent les métaux liquides, on ne peut en conclure rien autre chose si ce n'est que la mobilité des particules s'oppose à l'action qui met en jeu l'électricité lors des variations de température.

MM. Yelin, Sturgeon, Matteucci, Vorsselmann de Heer, Svanberg, Frantz, en analysant les courants thermo-électriques produits dans des masses de bismuth ou d'antimoine ou des circuits composés de ces deux métaux, ont trouvé des irrégularités qu'on ne peut attribuer qu'à l'état cristallin des métaux et au plan de clivage doué d'un plus grand éclat que les autres.

M. Svanberg (47) prépara des barres d'antimoine et de bismuth, dont les unes avaient le plan de clivage perpendiculaire à leur longueur, tandis que dans les autres l'intersection du plan de clivage était dans le sens de la longueur; les premières étaient plus négatives et les autres plus positives que toute autre barre de ces métaux. En mettant en contact deux barres d'antimoine ou de bismuth dont le clivage était perpendiculaire à la longueur, le courant allait du chaud au froid; tandis qu'avec celles dont la longueur était parallèle à l'intersection des deux plans de clivage, le courant allait du froid au chaud.

M. Frantz (48) répéta ces expériences avec des cubes d'antimoine et de bismuth; en variant leur position, il observa les faits suivants: Dans un cube de bismuth, l'inclinaison du plan de clivage indique la direction du courant; en chauffant les points de contact de deux cubes dont les plans principaux de clivage sont inclinés l'un à l'autre, il se manifeste un courant partant toujours de la direction équatoriale, et avec d'autant plus de facilité que l'angle des plans

principaux de clivage est plus grand. En mettant successivement en contact l'un des deux cubes d'antimoine ou de bismuth avec des cubes d'autres métaux, les courants diffèrent considérablement en intensité, suivant que le plan de clivage de l'un des deux premiers métaux est placé axialement ou équatorialement par rapport à la surface de contact où l'on applique la chaleur.

M. Matteucci a avancé que l'influence du plan de clivage, comme dans le diamagnétisme, tient à ce que les molécules sont plus rapprochées dans la direction de ces plans que dans la direction perpendiculaire. Il est parvenu effectivement à produire dans le bismuth, par la compression, des propriétés thermo-électriques semblables à celles que présente la cristallisation de ce métal.

Le contact de deux liquides inégalement chauds peut dégager également de l'électricité, ainsi que Nobili l'a remarqué (49) ; mais le phénomène tel qu'il a été observé est compliqué des effets résultant de l'inégalité de température des deux lames, car une lame chaude est négative par rapport à une lame froide plongée dans la même dissolution saline. Quant aux métaux fondus, ainsi qu'on l'a vu plus haut, ils ne manisfestent aucun effet thermo-électrique.

Piles thermo-électriques. Fourier et Œrsted (50) sont les premiers qui aient eu l'idée, en 1823, de former des piles thermo-électriques avec des barreaux de bismuth et d'antimoine soudés bout à bout ; en chauffant les soudures alternatives, maintenant les autres soudures à zéro et fermant le circuit, ils obtinrent un courant beaucoup plus énergique qu'avec un seul couple. En effet, la tension croît, comme avec les autres piles, proportionnellement au nombre des couples employés.

Les métaux qui donnent les actions les plus énergiques sont ceux qui viennent d'être cités ; cependant, d'après M. Poggendorf (51), une pile dans laquelle on emploie le fer et un alliage composé de nickel et de cuivre, c'est-à-dire le maillechort, donne, à égale température, une force électro-motrice plus grande que le platine et le fer.

Les piles thermo-électriques n'ont été employées jusqu'ici qu'à trouver des différences de température entre deux sources. On doit à M. Nobili en 1830 (52) cette application importante de la thermo-électricité, dont M. Melloni s'est servi si heureusement pour étudier les propriétés de la chaleur rayonnante. La pile de Nobili se composait de six petits couples, bismuth et antimoine, disposés en couronne et placés dans une boîte cylindrique, de telle sorte que les points de contact, de rang pair, se trouvaient sur une même

face, et ceux de rang impair sur l'autre face; les deux extrémités de cette pile étaient mises en rapport avec un galvanomètre à fil court. Cet appareil fut perfectionné par Nobili et Melloni réunis.

Melloni (53) a donné plus de sensibilité à cette pile en la composant de cinquante petits barreaux également de bismuth et d'antimoine, et les disposant du reste à peu près comme l'avait fait Nobili. La sensibilité de l'appareil est telle que, si l'on tourne une des faces de la pile, l'autre étant couverte avec un écran, vers une personne située à plusieurs mètres de distance, le calorique rayonnant de cette personne agit suffisamment pour faire dévier l'aiguille aimantée. On gradue cet appareil, par comparaison, pour le faire servir à la mesure des températures. M. Melloni, en comparant sa marche avec celle des thermomètres ordinaires et à l'aide d'une table des rapports entre les intensités du courant et les déviations de l'aiguille aimantée, a trouvé que, pour des déviations de l'aiguille allant jusqu'à 20°, l'intensité du courant est proportionnelle à la déviation.

M. Becquerel, en 1826 (54), a fait usage des courants thermo-électriques pour déterminer la température soit des flammes, soit des fourneaux, et plus tard celle des parties intérieures des animaux, du sol à diverses profondeurs. On explore la température des parties intérieures de l'homme et des animaux en y introduisant une aiguille composée de deux autres, l'une de cuivre et l'autre d'acier, soudées par un de leurs bouts, et en communication par les deux autres bouts avec un multiplicateur convenablement disposé et pourvu d'une table des intensités. La soudure des deux aiguilles est placée dans la partie organique dont on veut connaître la température, et l'autre jointure se trouve dans un milieu à température constante.

Dans plusieurs séries d'expériences, MM. Becquerel et Breschet (54') sont arrivés aux conséquences suivantes : 1° il existe une différence bien marquée entre la température des muscles et celle du tissu cellulaire dans l'homme et les animaux : dans l'homme elle varie de 1°,25 à 2°,25; 2° la température des muscles éprouve des variations par la contraction, le mouvement et la compression; 3° il existe une différence de plus d'un demi-degré entre la température du sang artériel et celle du sang veineux, etc., etc.

MM. Dutrochet (55) et Bergsma se sont servis du même procédé pour explorer la température des parties intérieures des végétaux et des fleurs; mais les phénomènes de chaleur sont tellement com-

plexes qu'il est très-difficile quelquefois d'avoir des déterminations exactes.

M. Becquerel a employé avantageusement les mêmes appareils thermo-électriques, en les modifiant, à la détermination de la température des eaux du lac de Genève à diverses profondeurs.

Quant à la température des flammes (56) et à celle des fourneaux à réverbère, il a fait usage d'une aiguille composée de deux fils de platine n'ayant pas le même diamètre, quoique très-petits, et réunies par un de leurs bouts au moyen de deux crochets passés l'un dans l'autre, ou bien enroulés l'un sur l'autre, les deux bouts libres étant mis en rapport avec un multiplicateur. Les points de jonction ayant été placés successivement dans trois des principales enveloppes de la flamme d'une lampe à alcool, au moyen d'une table des intensités, il a obtenu 1350°, 1080 et 780° pour la température la plus élevée, la température moyenne et la température minimum que prend un fil fin de platine placé dans l'une des trois enveloppes principales de la flamme.

M. Becquerel a fait servir encore les effets thermo-électriques à la détermination de la chaleur dégagée dans le frottement (57). Il semble résulter de ses expériences que les surfaces qui ont le plus grand pouvoir absorbant sont celles qui s'échauffent le plus dans le frottement.

M. Peltier (58), en disposant convenablement deux couples thermo-électriques de façon à former une pince, a pu étudier les actions calorifiques produites dans des conducteurs métalliques traversés par des courants électriques.

M. Pouillet (59) a construit également en 1836 un appareil thermo-électrique pour mesurer les plus hautes températures, comme les plus basses. Il a donné le nom de *pyromètre magnétique* à cet appareil. Le couple actif est composé d'un canon de fusil et d'un fil de platine partant du milieu de la culasse où il est incorporé à la masse de fer et isolé du canon : ces deux éléments ayant été mis en communication avec une boussole, on place la culasse dans le foyer de chaleur. En comparant la marche de l'intensité du courant électrique développé à celle du pyromètre à air, il a vu que l'intensité du courant n'était pas proportionnelle à la température entre les limites de température où il a opéré ; mais il n'en est pas de même d'un couple bismuth et cuivre.

M. Regnauld (60), en 1849, a comparé, de son côté, la marche d'un appareil thermo-électrique à celle d'un thermomètre étalon ;

après des recherches très-précises, il en a conclu que les courants électriques sont dus à des changements moléculaires toujours plus ou moins irréguliers pendant la propagation de la chaleur, irrégularités que l'on ne rencontre pas avec les autres moyens de déterminer les températures.

Mais si le thermo-multiplicateur ne peut remplacer sous le rapport de l'exactitude le thermomètre ordinaire, il peut être employé avantageusement toutes les fois que l'on cherche des différences de température instantanées et comprises entre des limites très-rapprochées, comme l'ont fait MM. Becquerel et Breschet dans leurs recherches sur la température de l'homme et celle des animaux, et que les thermomètres ordinaires ne sont pas en état d'accuser; ces différences n'allant pas au delà de 1 à 3°, on peut regarder comme exactes les indications obtenues, car alors les variations du thermo-multiplicateur ne sont pas appréciables.

§ III. *Dégagement de l'électricité dans les actions chimiques.*

La question du dégagement de l'électricité est d'une grande importance pour applications aux arts; elle est du même ordre que celle de la production de la chaleur : aussi les recherches doivent-elles tendre à se procurer le plus d'électricité possible sous forme de courant par les moyens les plus simples et les moins dispendieux. Mais, comme les actions chimiques sont les sources les plus fécondes d'électricité, nous exposerons les principales recherches faites pour découvrir les lois du dégagement d'électricité qui en résulte.

Lorsque Volta, en décrivant la pile, annonçait que le dégagement d'électricité produit dans cet appareil était dû au simple contact des deux métaux composant chaque élément, et que le corps intermédiaire humide qui séparait deux couples voisins remplissait seulement les fonctions de conducteur, il s'appuyait sur un principe que la science a écarté depuis. On sait aujourd'hui que le dégagement d'électricité n'a lieu qu'autant que le contact est suivi d'une action mécanique, physique ou chimique, c'est-à-dire qu'autant qu'il y a un travail moléculaire de produit. La pile n'en reste pas moins, en physique, la plus grande découverte des temps modernes.

Les premières expériences entreprises dans le but de recueillir de l'électricité dans les actions chimiques ont été faites d'abord par Lavoisier et Laplace, puis par Volta et de Saussure (page 13):

mais les résultats qu'ils obtinrent étaient tellement complexes qu'ils ne purent arriver à formuler aucune loi. D'un autre côté, les opinions contradictoires émises par Volta, Fabroni, Wollaston et Davy sur la cause du dégagement de l'électricité dans la pile, comme on l'a vu page 26, tenaient les esprits en suspens sur l'influence que pouvait exercer l'action chimique; la découverte d'Œrsted mit un terme à cette indécision en fournissant les moyens d'étudier la question de manière à la résoudre complétement.

En 1823, Œrsted (61) inséra dans les *Annales de chimie et de physique* une note sur quelques applications faites avec le multiplicateur de Schweegger. Dans cette note, il mentionnait les effets électriques contraires obtenus par M. Avogadro, en plongeant différents couples métalliques dans de l'acide nitrique concentré et dans de l'acide nitrique étendu. Il se bornait à dire, en mentionnant le couple antimoine et arsenic, que le phénomène d'inversion paraissait être en rapport avec l'action chimique qu'exerce l'acide sur les deux métaux dans ses différents degrés de concentration; on a vu (page 34) que Davy avait déjà signalé le renversement des pôles d'une pile chargée avec le sulfure de potassium. Il cite encore le fait suivant : si l'on plonge successivement deux lames de zinc dans de l'acide sulfurique ou chlorhydrique étendu, la lame qui est plongée la première se comporte envers l'autre comme le métal le plus positif. Œrsted ne tira aucune conséquence de ces faits.

M. Becquerel (62), sans avoir eu connaissance de la note remise par Œrsted à Arago pour être insérée dans les *Annales*, et qui n'était pas encore imprimée, communiquait à l'Académie des sciences, dans la séance du 19 mai 1823, un mémoire dans lequel il exposait ses premières recherches sur les phénomènes thermo-électriques et sur les effets électriques produits dans les actions chimiques.

M. Becquerel s'exprimait ainsi : En plongeant l'un après l'autre, dans de l'acide nitrique ordinaire, les deux bouts du fil de cuivre d'un galvanomètre, l'action chimique était énergique, et l'aiguille aimantée était fortement déviée; le bout plongé le premier prenait au liquide l'électricité positive. En variant les expériences, il reconnut que le sens du courant était déterminé par le bout qui était le plus attaqué, celui-ci devenant négatif; en opérant avec deux fils de platine fixés aux extrémités du galvanomètre, il n'y avait courant qu'autant que l'on versait quelques gouttes d'acide chlorhydrique près de l'un des fils de platine immergés, pour que le métal fût attaqué; dans ce cas, le fil attaqué était négatif. Enfin, en

faisant réagir un acide sur un alcali, il observa que pendant leur combinaison, l'acide prenait l'électricité positive, et l'alcali l'électricité négative. La loi générale qui régit le dégagement de l'électricité dans les actions chimiques fut exprimée dans ce mémoire comme il suit : « Quand un corps se combine avec un autre, celui qui se comporte comme acide rend libre de l'électricité positive, et celui qui agit comme alcali, de l'électricité négative. »

M. Becquerel (63) présenta à l'Académie des sciences, dans la séance du 7 juillet 1823, un mémoire ayant pour titre : *Des effets électriques qui se développent pendant diverses actions chimiques*. Dans ce mémoire il démontra l'exactitude de la loi qui régit ces effets, en se mettant à l'abri de toutes les causes qui compliquaient le phénomène, non seulement dans les cas cités précédemment, mais encore dans la combinaison des alcalis avec les oxydes. Il annonça en même temps que les doubles décompositions ne dégageaient pas d'électricité. Il fit voir, dans le même mémoire, que les effets électriques obtenus avec un circuit composé d'un seul métal et d'un liquide additionné de quelques gouttes d'un autre liquide capable d'attaquer l'un des bouts de la lame ou du fil de métal, étaient encore les mêmes que dans un circuit mixte de deux métaux, en interposant entre eux une bande de papier humide, pour éviter l'effet de l'action électromotrice de contact, si toutefois elle existait.

Le 22 septembre 1823, M. Becquerel (64) fit connaître à l'Académie des sciences un procédé à l'aide duquel on pouvait mesurer l'intensité de l'action chimique au moyen des effets électriques qui en résultaient. Deux mois après (65), il décrivit les effets électriques produits par la réaction des acides et des alcalis sur l'eau et dans les actions capillaires. Il indiqua ensuite un procédé à l'aide duquel on peut reconnaître de très-petites quantités de cuivre alliées à l'or.

Le 12 avril 1824, il exposa à l'Académie des sciences (66) les effets électriques de tension obtenus dans les actions chimiques au moyen de l'électroscope condensateur de Bohnenberger qu'il avait perfectionné, effets qui étaient les mêmes que ceux accusés par le galvanomètre. Il décrivit en même temps un procédé à l'aide duquel on peut rendre sensibles les altérations que certaines dissolutions éprouvent au contact de l'air. Il suffit, pour cela, de placer dans la dissolution deux lames de platine en rapport avec un galvomètre, d'en retirer une, et de la replonger quelques instants

après : il en résulte un courant dirigé dans un sens tel que la lame replongée, et qui a été en contact avec l'air, prend l'électricité positive.

M. Becquerel (67), le 31 mai 1824, exposa devant l'Académie la théorie de la distribution de l'électricité dans la pile de Volta, au moyen des effets électriques produits dans la réaction des liquides sur les métaux. Le 5 juillet suivant (68), il fit voir quels étaient les effets électriques produits dans le contact de certaines flammes et des métaux et dans la combustion; mais il reconnut que dans la combustion, qui n'est autre que la combinaison de l'oxygène avec un corps combustible, les effets observés se compliquaient d'effets thermo-électriques contre lesquels il se mit en garde plus tard.

Les décompositions chimiques devaient donner lieu à des effets électriques inverses de ceux qui se manifestent dans les combinaisons; M. Becquerel mit ce fait en évidence (69), le 3 octobre 1824, à l'aide d'une éponge de platine plongée dans l'eau oxygénée : l'éponge, en se recouvrant d'oxygène au moment de son immersion dans l'eau oxygénée, devenait négative, état électrique qui lui était communiqué par l'oxygène à l'instant où il abandonnait l'eau. Dans ce mémoire, où il décrivait toutes les expériences relatives à la décomposition de l'eau oxygénée, il montra comment on pouvait mettre en évidence les effets électriques produits dans les actions chimiques en opérant avec deux lames d'or, de l'acide chlorhydrique ou nitrique, versant près de l'une d'elles quelques gouttes d'une dissolution de nitrate ou de chlorure alcalin, et en déduisit un procédé électro chimique pour découvrir dans une dissolution la présence d'un de ces deux sels.

Ainsi, en moins de deux ans, il posa les lois générales de dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, et l'on verra dans le chapitre suivant que, quelques années plus tard, il compléta son œuvre en créant les piles à deux liquides ou à courants constants.

M. Pouillet (70), dans un mémoire présenté à l'Académie des sciences en 1825, exposa le résultat de ses recherches sur l'électricité des fluides élastiques et sur une des causes de l'électricité de l'atmosphère, questions qui avaient déjà occupé Laplace, Lavoisier, Volta et de Saussure (p. 13). Voici les principales conséquences qu'il en déduisit :

1° Dans la combustion du charbon, ce corps prend l'électricité négative; l'oxygène, et par suite le gaz acide carbonique, l'électricité positive : ce qui est conforme aux lois qui régissent le dégage-

ment de l'électricité dans les actions chimiques. M. Matteucci a avancé, depuis, que le dégagement d'électricité n'avait pas lieu lorsque l'air était très-sec, et que dès lors le fait était infirmé. Ce fait est vrai, mais n'infirme pas la loi générale du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, attendu que l'oxygène de l'air, n'étant pas conducteur de l'électricité, ou bien ne faisant pas partie d'une électrolyte, ne saurait donner de l'électricité qui pût être recueillie lors de sa combinaison avec le charbon.

2° Dans la combustion de l'hydrogène, l'intérieur de la flamme est négatif, et l'extérieur positif.

Dans ce dernier cas, les effets ayant été observés avec des spirales de platine, il en est résulté des effets thermo-électriques semblables à ceux attribués à la combustion de l'hydrogène, ce qui complique le phénomène; M. Becquerel, qui en a fait la remarque, a donné un moyen d'éviter ces effets complexes (71).

3° Le développement de l'action végétale, immédiatement après la germination des graines, alors que les tigelles reçoivent l'action de la lumière, dégage de l'électricité; la jeune plante est négative, comme le charbon dans la combustion; le gaz acide carbonique, en s'échappant, emporte de l'électricité positive.

Suivant M. Pouillet, l'action des végétaux sur l'oxygène de l'air est une des causes les plus puissantes et les plus permanentes de l'électricité atmosphérique. Nous ne partageons pas son opinion à cet égard; nous en ferons connaître plus loin les motifs.

Le même physicien (72), dans un second mémoire, lu à l'Académie des sciences le 4 juillet 1825, est revenu sur l'électricité qui se développe dans les actions chimiques et sur l'origine de l'électricité de l'atmosphère. Il a commencé par montrer, contrairement à l'opinion de plusieurs de ses devanciers, que l'évaporation de l'eau parfaitement pure ne donne pas d'électricité, ainsi que celle de plusieurs acides; mais que, lorsque l'eau contient en dissolution de la strontiane, et qu'on la projette dans un creuset de platine convenablement chauffé, il y a un dégagement d'électricité bien marqué, à l'instant où le liquide qui avait formé une petite sphère éprouve un frémissement à la suite duquel il disparaît complétement. Le creuset est positif, et la vapeur négative. M. Pouillet dit bien : le degré de chaleur du creuset, qui produit le frémissement et la subite séparation des éléments, est la seule cause qui donne les fortes tensions; mais il faut ajouter que c'est là la seule cause du phénomène. En mêlant à l'eau de l'ammoniaque, celle-ci, en se va-

porisant, prend de l'électricité positive; en y substituant de l'acide sulfurique, qui est moins volatil que l'eau, celle-ci, pendant l'évaporation, prend également de l'électricité: dans ces deux cas, les effets électriques sont dus à des décompositions chimiques.

En opérant avec des solutions salines faibles, on a également, d'après M. Pouillet, de l'électricité par la ségrégation chimique qui accompagne l'évaporation; il a pris pour exemple une solution étendue de chlorure de sodium, à cause de l'analogie qui existe entre les résultats qu'elle présente et les phénomènes qui ont lieu à la surface des eaux. Il s'ensuivrait donc que l'évaporation pure et simple de l'eau à la surface des mers serait une cause incessante de production d'électricité; mais il n'en est pas ainsi, car Peltier (73) a prouvé que, dans l'évaporation des solutions salines, il n'y avait production d'électricité qu'à l'instant de la décrépitation, c'est-à-dire lorsque l'eau interposée s'échappait. M. Pouillet, comme nous venons de le dire, avait signalé ce cas, mais non pas comme unique. Il fut démontré dès lors que l'évaporation de l'eau à la surface des mers ne dégage pas d'électricité.

M. Gaugain (74) a cherché à montrer que l'électricité produite dans l'expérience précédente était due à un frottement analogue à celui qui est produit dans l'expérience d'Armstrong, c'est-à-dire au frottement contre la paroi du vase des globules d'eau emportés par la vapeur. On a vu (page 150) que le frottement des gaz ou des vapeurs pouvait donner lieu à un dégagement d'électricité dans des circonstances du même genre.

M. de la Rive (75), en 1828, publia des recherches intéressantes sur la cause de l'électricité voltaïque, qui le conduisirent aux mêmes conséquences que celles qui résultent des expériences précédemment mentionnées (pages 162 et 163). Un couple d'or et de platine très-purs, en contact avec de l'acide nitrique, ne fonctionne qu'autant qu'on ajoute quelques gouttes d'acide chlorhydrique pour attaquer l'or. En étudiant le courant produit par l'action mutuelle de deux liquides, il reconnut que celui qui se comportait comme acide prenait l'électricité positive, et celui qui agissait comme alcali, l'électricité négative. Ces deux faits, bases de l'électro-chimie, avaient été observés par M. Becquerel en 1823 et 1824. M. Delarive démontra ensuite que le sens du courant, dans un couple composé de deux métaux différents, change suivant que l'on emploie pour le rendre actif un liquide qui attaque l'un ou l'autre métal, celui qui

est le plus attaqué prenant l'électricité négative au liquide. Ce fait avait déjà été observé par Davy (page 34), qui n'en tira aucune conséquence, n'admettant pas la présence de l'électricité dans les actions chimiques.

Dans ce même mémoire M. de la Rive étudia : 1° l'influence de la température sur la facilité que possède l'électricité à passer d'un métal dans un autre; 2° les causes qui déterminent la production de l'électricité dite de contact sous forme de tension. Il arriva à cette conséquence, que l'électricité est toujours le résultat d'une action, et jamais d'un état, et que l'on doit la considérer plutôt comme un effet que comme une cause; il lui a été facile ensuite de donner une théorie de la pile, en s'appuyant uniquement sur l'électricité dégagée dans la réaction du liquide sur le métal le plus oxydable. Ce travail, qui a confirmé tous les faits observés antérieurement par M. Becquerel, a contribué puissamment à renverser définitivement la théorie du contact.

M. Faraday, depuis 1832, a publié dans les *Transactions philosophiques* une série de recherches importantes sur l'électricité, qui l'ont conduit à la découverte des effets de l'induction. Nous ne parlerons seulement ici que de la seizième série, qui est relative à l'origine du pouvoir de la pile de Volta (76). Le travail de M. Faraday a pour but de démontrer l'origine chimique de l'électricité dans la pile, question qui se rapporte au chapitre que nous traitons. Dans ce travail publié en 1840, M. Faraday a accumulé les preuves pour démontrer l'origine chimique de la pile, en écartant complétement l'action de contact. Voici les principales conséquences auxquelles ses recherches l'ont conduit : 1° Dans un circuit fermé, composé de deux métaux et d'un liquide qui ne réagit sur aucun d'eux, il n'y a pas de courant; M. Becquerel avait démontré ce fait dix sept ans auparavant (p. 161). 2° Dans les circuits fonctionnant avec un liquide actif, le métal le plus attaqué imprime la direction au courant. Ce fait est la conséquence du précédent. 3° Les effets obtenus par l'emploi de la chaleur dans les couples voltaïques sont une confirmation de la théorie chimique. 4° En étendant plus ou moins d'eau le liquide qui fait fonctionner un couple, les résultats obtenus peuvent dépendre, dans certains cas, de la nature de l'acide comme substance décomposable, c'est-à-dire comme *électrolyte*, suivant l'expression de M. Faraday. Quelle que soit la circonstance qui tende à augmenter la puissance chimique du liquide et à le rendre meilleur électrolyte, cette circonstance favorise la pro-

duction d'un courant déterminé. Tous ces faits découlent des principes énoncés par M. Becquerel. Nous ajouterons que M. Faraday n'a pas tenu compte du pouvoir conducteur du liquide, qui doit être pris en considération dans des expériences de ce genre, puisqu'il s'oppose à ce qu'on puisse déterminer rigoureusement le rapport existant entre l'intensité du courant et le degré d'énergie de l'action chimique.

M. Becquerel (77), en 1835, construisit un couple, dit à oxygène, formé d'acide nitrique et d'une solution concentrée de potasse caustique, séparée de l'acide par un diaphragme perméable, et de deux lames de platine, réunies par un fil de même métal formant le circuit; dans ce couple, l'eau et l'acide nitrique sont décomposés; la lame qui plonge dans la potasse se recouvre de bulles d'oxygène, et l'autre donne naissance à de l'acide nitreux. L'effet électro-chimique produit est dû au dégagement de l'électricité qui a lieu dans la réaction de l'acide sur l'alcali : Le premier donne de l'électricité positive, le second de l'électricité négative. Cette pile, qui fonctionne avec un même métal inoxydable, et deux liquides différents, a reçu le nom de *pile à oxygène*, car l'action du courant donne lieu à un dégagement d'oxygène sur la lame de platine plongeant dans la potasse, quand le circuit est fermé.

M. de la Rive (78), dans le cours de ses recherches électro-chimiques, a observé un fait curieux : le zinc distillé, et par conséquent très-pur, est à peine attaqué quand on le plonge dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, tandis que le zinc du commerce l'est fortement. Si le premier zinc constitue un couple voltaïque avec du platine, le courant devient plus fort, et il en résulte un dégagement d'hydrogène plus considérable qu'avec le second, mis dans les mêmes conditions. La différence dans les effets produits a été attribuée à la présence dans le zinc du commerce de petites quantités de cadmium ou de fer, qui constituent avec le zinc une multitude de courants partiels qui augmentent d'autant l'action chimique, et dont M. Sturgeon a démontré l'existence en explorant tous les points de la surface de zinc avec des aiguilles de platine en relation avec un multiplicateur. D'autres métaux présentent le même phénomène que le zinc. En amalgamant le zinc, comme on le verra plus tard, et ainsi que l'avait proposé antérieurement J. Davy en 1826, on fait disparaître tous les pôles partiels, puisque la surface devient partout uniforme.

M. Matteucci, prenant en considération les effets électriques produits quand on fait évaporer de l'eau dans un vase de métal oxydable, a opéré avec une capsule de platine, au fond de laquelle il avait étendu un petit morceau de potassium. En laissant tomber une goutte d'eau sur le potassium, il s'est produit aussitôt une vive déflagration, et la capsule est devenue fortement négative. On voit donc que toutes les expériences faites depuis les recherches de M. Becquerel ont confirmé l'exactitude des lois qu'il avait données du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques.

Il s'agissait de rattacher les effets électriques qui se manifestent dans les actions chimiques à l'état électrique présumé des atomes; M. Becquerel (79) a exposé les vues d'Ampère à ce sujet. Ce dernier établit que les molécules des corps possèdent un état électrique permanent dépendant de leur nature, qu'une molécule oxygène est éminemment négative et entourée d'une autre atmosphère d'électricité contraire, et qu'une molécule d'hydrogène est dans des états opposés; une combinaison a-t-elle lieu, les atmosphères, en se combinant, forment du fluide neutre, et les molécules restent unies l'une à l'autre en vertu de l'action attractive des électricités contraires, comme cela a lieu quand deux corps mauvais conducteurs et chargés d'électricité sont en contact. Cette théorie ingénieuse, présentée avec art, n'a pas été adoptée, à raison des objections sérieuses qu'elle a soulevées.

Polarisation; pile à gaz. Lorsque des lames de platine ou d'or ont servi à transmettre un courant électrique dans un liquide tel que l'eau acidulée, elles sont dites polarisées, car elles peuvent donner lieu à un courant inverse après le passage de l'électricité dans le liquide, mais l'effet secondaire est de courte durée; cette polarisation, qui avait été observée par Ritter dans les piles secondaires (voir page 36), avait été rapportée en 1825 par M. Delarive (80) à un état moléculaire particulier communiqué par l'électricité. M. Peltier prouva, de son côté, que les colonnes liquides se polarisaient également. M. Becquerel (81) expliqua le premier la polarisation par la présence d'éléments alcalins et gazeux sur les lames qui avaient servi à opérer des décompositions électro-chimiques.

M. Matteucci (82), en 1838, communiqua à l'Académie des sciences les résultats d'expériences qui furent le complément de cette explication, en montrant que deux lames de platine plongées préalablement l'une dans l'oxygène, l'autre dans l'hydrogène, puis immergées dans l'eau acidulée, constituent un couple. Il montra plus

tard que des gaz autres que l'oxygène et l'hydrogène pouvaient donner lieu à des effets analogues.

M. Grove (83), en 1839, eut l'idée de réunir en piles des couples formés par des lames de platine plongées mi-partie dans de l'oxygène ou de l'hydrogène, et mi-partie dans l'eau acidulée. Il obtint ainsi ce que l'on nomme *la pile à gaz*, dans laquelle il n'entre qu'un seul liquide, un seul métal et deux gaz. Les recherches qui furent faites à l'aide de cet appareil, soit par M. Grove, soit par les autres physiciens, parmi lesquels nous citerons MM. de la Rive, Faraday, Schœnbein, ont montré que la cause de la production de l'électricité dépend de la combinaison lente des gaz dissous dans le liquide, sous l'action des lames de platine. Comme le gaz hydrogène est fort peu soluble dans l'eau, il est donc probable que le dégagement de l'électricité provient de la combinaison de l'oxygène dissous dans le liquide avec l'hydrogène adhérent au platine; ce métal, comme le charbon ou d'autres corps solides que l'on peut employer, ne sert que d'intermédiaire pour opérer la combinaison des gaz, et permettre la circulation de l'électricité.

Lorsque l'on opère avec une pile à gaz, un seul gaz, comme l'hydrogène, ne peut déterminer d'effet électrique, à moins que le liquide ne soit aéré ou ne contienne une substance en dissolution capable de réagir sur l'hydrogène; tel est l'effet produit quand on opère avec de l'eau chlorée. M. E. Becquerel (84) a montré qu'une dissolution du chlorure d'or, pouvait produire un effet analogue et remplacer l'oxygène et l'eau acidulée dans la pile à gaz.

Des recherches ont été faites sur la polarisation des lames, non-seulement par les physiciens que nous avons cités, mais encore par MM. Wheatstone, Svanberg, Lenz et Sawelgev (85), Poggendorf (86), Beetz (87) et E. Becquerel (88).

M. E. Becquerel a montré quelle était l'influence de la nature du métal et de l'intensité du courant initial sur le phénomène de polarisation, en faisant usage d'une méthode particulière pour déterminer la force électro-motrice due à la présence des gaz à la surface des lames métalliques. Il a été conduit à cette conclusion, qu'au moment de la polarisation, non-seulement chaque lame avait une action spéciale et indépendante l'une de l'autre, comme on l'avait admis auparavant d'après les observations de M. Schœnbein, Matteucci, Lenz et Sawelgev, etc., mais encore que le gaz, qui est dit à l'état naissant à la surface de la lame, agissait autrement et plus énergiquement que si la lame eût été plongée

préalablement dans du gaz préparé séparément ; cela tient à ce que ces gaz, en sortant des combinaisons, sont dans un état particulier analogue à celui de l'oxygène, dont on parlera plus tard, ou bien à une action chimique qui n'est pas encore définie.

Nous devons dire également, en parlant des actions exercées par les gaz, que M. E. Becquerel (89) a montré que l'hydrogène, en présence du platine, pouvait donner lieu à la production d'électricité statique, appréciable à un électroscope ordinaire.

Effets électriques dus à l'action chimique de la lumière. M. E. Becquerel a découvert, en 1840 (90), que les réactions chimiques opérées sous l'action de la lumière pouvaient donner lieu à des effets électriques analogues à ceux qui se manifestent quand deux corps réagissent chimiquement l'un sur l'autre ; ainsi des substances impressionnables comme le chlorure ou le bromure d'argent, placées sur des lames de platine ou d'or, donnent lieu au développement d'un courant électrique assez énergique au moment où la lumière les frappe. Le sens de ce courant est tel que la lame recouverte des corps impressionnables, et qui est exposé au rayonnement prend l'électricité positive, et le liquide environnant la négative.

Il a étudié dans plusieurs mémoires (91) les actions des différentes parties actives du rayonnement lumineux, en faisant usage des courants électriques développés lors de l'action chimique produite, non-seulement à l'aide de lames inoxydables recouvertes de matières diverses, mais encore en employant des lames métalliques d'argent ou de cuivre, recouvertes directement de composés impressionnables. L'appareil qui contient les lames excitables a été nommé par lui *actinomètre électro-chimique*, et pour certaines parties du rayonnement cet instrument est analogue à la pile thermo-électrique pour la chaleur rayonnante. L'actinomètre se compose essentiellement d'une petite cuve à eau remplie d'un liquide conducteur inactif ; deux lames d'argent exposées à la vapeur d'iode, ou bien deux lames de platine aussi identiques que possible, recouvertes de matières impressionnables, s'y trouvent plongées : l'une d'elles est soustraite à l'action de la lumière, et la partie active du rayonnement vient frapper l'autre ; aussitôt que cet effet a lieu, un galvanomètre très-sensible, dont les deux extrémités du fil touchent aux lames, accuse la présence d'un courant électrique qui ne dure qu'autant que la lumière exerce son action.

Il est évident que chaque substance impressionnable à la lumière étant sensible entre des limites différentes de réfrangibilité, et par

conséquent étant influencée par des parties différentes du rayonnement solaire, il faut étudier l'action du rayonnement avec chacune d'elles. Mais, en 1848, M. E. Becquerel (92), ayant découvert une substance chimiquement impressionnable très-remarquable (le sous-chlorure d'argent violet, préparé sur une lame d'argent fixée au pôle positif d'une pile, et plongeant dans une solution d'acide chlorhydrique), substance qui a la faculté de recevoir les impressions colorées de toutes les parties du rayonnement lumineux, et avec les couleurs mêmes des rayons lumineux, c'est-à-dire ayant montré que cette matière permettait de *peindre avec la lumière*, eut l'idée de substituer aux lames de l'actinomètre de nouvelles lames recouvertes de cette substance. Il trouva en effet que, lors de l'action des rayons lumineux sur elle, non-seulement il se produisait une coloration permanente, mais encore que cet effet était accompagné d'une réaction chimique, et par suite d'un courant électrique facilement appréciable et même mesurable à l'aide d'un multiplicateur (93). Comme cette matière est sensible entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine, et que la partie la plus lumineuse du spectre solaire est aussi celle où a lieu le maximum d'action exercée sur elle, ces résultats, joints aux effets de coloration présentés par la matière, permettent d'entrevoir la possibilité de se servir des effets électriques dans l'étude de la photométrie, puisque les expériences faites ont permis de penser qu'il y a proportionnalité entre l'effet lumineux produit sur la rétine et l'action chimique exercée sur la substance dont il est question.

§ IV. *Dégagement de l'électricité dans les actions physiologiques.*

Végétaux. M. Donné (94) fut le premier qui ait fait quelques recherches pour étudier les effets électriques produits dans les fruits par l'hétérogénéité des liquides différents séparés par des tissus. Il a trouvé, à l'aide d'aiguilles de platine en relation avec un multiplicateur, que, dans la poire, quand elle n'a pas atteint son degré de maturité, le liquide qui environne la queue est négatif, tandis que celui qui est du côté de l'œil est positif. Dans la pêche et la prune, les effets sont inverses.

Le dégagement d'électricité dans les corps organisés a une origine chimique ou physiologique; M. Becquerel (95) a traité cette question dans plusieurs mémoires, de manière à ne laisser aucun doute sur la cause du phénomène. Les corps organisés sont com-

posés de parties solides et liquides séparées par des membranes, des tissus, par l'intermédiaire desquels les liquides réagissent les uns sur les autres, d'où résulte une production d'électricité. Il existe dans les végétaux, par exemple, une séve ascendante ou intérieure, et une séve corticale, qui n'ont pas la même composition, et réagissent l'une sur l'autre en produisant des effets électriques qui servent à établir une différence bien marquée entre les liquides humectant l'écorce et le ligneux. On observe ces effets au moyen d'aiguilles de platine et du galvanomètre ou de l'électroscope. En explorant toutes les parties d'un végétal, on arrive aux conséquences suivantes : depuis la moelle jusqu'au cambium, les enveloppes ligneuses sont de moins en moins positives relativement à la moelle; tandis que, depuis le cambium jusqu'à l'épiderme, les couches corticales et parenchymeuses sont de plus en plus positives. Cette inversion dans les effets électriques s'accorde avec la position du tissu cellulaire dans l'écorce et dans le ligneux. Dans une section longitudinale, on reconnaît que la séve parenchymeuse n'est pas la même en deux points peu éloignés.

La terre étant en communication directe avec les végétaux par l'intermédiaire des racines, et humectée comme ces derniers de liquides variant de nature d'un lieu à l'autre, il doit en résulter des effets électriques de contact; l'expérience prouve effectivement que la terre est toujours positive par rapport aux tissus parenchymeux des tiges, tandis que celles-ci, ainsi que les feuilles, sont toujours négatives, état qu'elles doivent faire partager à l'air; ainsi la végétation agit en sens inverse des causes qui rendent l'air positif et la terre négative. Il y a quelque probabilité à supposer que les effets électriques, en raison de leur continuité, surtout dans les parties de la surface terrestre où la végétation a le plus de puissance, telles que les régions tropicales et les contrées boisées, doivent exercer une certaine influence sur l'état électrique de l'atmosphère, qui joue un si grand rôle dans la production des principaux phénomènes météorologiques.

M. Becquerel s'est demandé ensuite s'il ne circulait pas constamment des courants électriques, non-seulement dans les végétaux, mais encore entre ces derniers et la terre. En discutant cette question, il est arrivé à cette conclusion : la distribution de la séve ascendante et de la séve du parenchyme cortical porte à croire qu'il circule continuellement dans les végétaux des courants dirigés de l'écorce à la moelle en passant par les racines et la terre, et peut-

être sans passer par ces deux intermédiaires. Mais ces effets sont tellement complexes qu'il est impossible d'en rien conclure sur le rôle que l'électricité peut jouer dans les végétaux.

M. Becquerel, communiqua à l'Académie des sciences, dans la séance du 4 novembre 1850, le résultat de ses recherches sur les courant électriques dans les végétaux. M. Wartmann (96) était arrivé à des résultats à peu près semblables, dans des recherches du même genre, mais qui ne furent publiés qu'après ceux de M. Becquerel. M. Zantedeschi a traité également la question du dégagement de l'électricité dans les végétaux (97).

Dans les fruits, les tubercules et les racines, on observe des effets électriques du même genre. M. Becquerel, en explorant les effets électriques produits dans cette circonstance, a constaté des faits qui ne sont pas sans quelque importance : dans la pomme de terre, les sucs n'ont pas la même composition depuis l'épiderme jusqu'au centre; ce tubercule, ainsi que plusieurs autres, se comportent comme le système cortical d'une tige ligneuse, c'est-à-dire que la partie sous l'épiderme est positive relativement à toutes les autres; il en est de même des parties contiguës par rapport aux parties centrales, etc., etc. On voit par là le parti que l'on peut tirer du mode d'expérimentation dont on vient de parler pour étudier les différences de composition des parties organiques des plantes, des fleurs, des fruits, etc., et savoir quelles sont celles qui jouent le rôle d'acide ou d'alcali dans la réaction des liquides qui les humectent.

M. Buff (98) a étudié de nouveau les effets électriques dans les végétaux, en se servant de deux vases de verre contenant une petite quantité de mercure, où plongeaient deux fils de platine en relation avec un multiplicateur; sur ce mercure, on versait de l'eau, puis on établissait la communication entre les deux vases avec un végétal, les racines dans un vase, les feuilles dans l'autre, ou bien avec les diverses parties d'une plante; le courant allait dans le végétal des racines vers les feuilles. Dans ce mode d'expérimentation, le mercure peut être attaqué par l'eau, et en outre on ne peut pas analyser les effets électriques produits par le contact des parties les plus rapprochées des végétaux, comme on le fait avec des aiguilles de platine.

Les effets électriques produits au contact des terres et des eaux douces ont été également étudiés par M. Becquerel (99). De nombreuses expériences faites sur différents points de la France et sur les côtes de la mer, lui ont prouvé que la terre végétale est tou-

jours positive à l'égard de l'eau douce et même de l'eau de mer. Dans les marais salants, les terres, au contraire, sont négatives par rapport aux eaux douces. La force électro-motrice au contact de la terre végétale de l'eau de mer est environ, toutes choses égales d'ailleurs, vingt-quatre fois plus forte que celle qui a lieu au contact des terres et des eaux douces. La première est les 0,45 de celle d'un couple à sulfate de cuivre, toutes choses égales d'ailleurs.

Parmi les sources naturelles d'électricité qui en fournissent continuellement à l'air, on doit distinguer les suivantes, d'après ce qui a été dit précédemment : 1° l'exhalation de l'oxygène et du gaz acide carbonique par les feuilles des végétaux, laquelle fournit à l'air de l'électricité positive ;

2° Le contact des terres et des eaux douces ou salées : les premières prennent un excès d'électricité positive, et les secondes un excès d'électricité contraire ;

3° Les végétaux vivants se comportent de même à l'égard de la terre ;

4° La décomposition des matières animales et végétales à la surface de la terre et dans l'eau ;

5° Le contact des eaux froides et des eaux chaudes circulant sur la surface des mers : les eaux froides sont positives à l'égard des eaux chaudes.

Or, comme ces sources dégagent les unes de l'électricité positive, les autres de l'électricité négative, il s'opère donc des recompositions continuelles, et l'électricité atmosphérique prouve qu'en définitive, dans l'atmosphère, la résultante est un excès d'électricité positive.

Animaux. On a recherché également la présence de l'électricité dans l'homme et les animaux, notamment dans les poissons électriques, où la manifestation de l'électricité a lieu par des effets assez énergiques pour qu'il en résulte des commotions et même des étincelles ; nous avons déjà parlé (page 11) des poissons électriques

Les poissons électriques, savoir : la torpille, le gymnote et le silure, depuis la découverte d'Œrsted, ont été le sujet de nombreuses recherches qui ont mis en évidence l'origine électrique de la commotion que l'on éprouve en les touchant. Gay-Lussac et de Humbolt avaient déjà remarqué qu'on n'éprouvait aucun effet en plaçant le poisson entre deux plateaux de métal que l'on tenait à la main et les faisant toucher en un point, tandis que l'on ressentait une secousse quand ils ne se touchaient pas. On pouvait déjà in-

férer de là que le phénomène avait beaucoup d'analogie avec la décharge de la bouteille de Leyde.

Davy (100) et M. Becquerel (101), chacun de son côté, ont obtenu des effets électro-magnétiques pendant la décharge de la torpille, avec le galvanomètre et des hélices ; M. Matteucci et le père Linari ont vu l'étincelle avec des hélices et des spirales.

M. Faraday (102), qui a déterminé le sens du courant électrique dans le gymnote, le plus étudié des poissons électriques après la torpille, a trouvé que la décharge est dirigée de la tête à la queue dans l'eau où il plonge. M. Delarive pense que le gymnote produit la secousse électrique indépendamment de sa volonté. Dans une série d'expériences qu'il a faites en commun, en 1845, avec M. Matteucci, ces deux physiciens ont observé un fait qui assimile le courant du gymnote à celui d'une pile voltaïque ; voici en quoi consiste ce fait : si l'on touche l'animal, d'une part, au milieu du corps ; d'autre part, à la tête ou à la queue, on a un courant moitié moins intense que celui qu'on obtient en touchant la tête et la queue.

Nous dirons également que MM. Miranda et Pacini (103) ont fait une étude détaillée des propriétés électriques du gymnote, qui ont été mises en évidence en produisant les effets magnétiques, calorifiques et chimiques qu'on avait déjà obtenus dans la décharge de la torpille.

M. Matteucci (104), pour reconnaître la distribution sur le corps de la torpille des points qu'il faut toucher pour recevoir la décharge, le recouvre de grenouilles préparées, qui se contractent plus ou moins, suivant l'énergie de la décharge.

Les poissons électriques possèdent des organes spéciaux qui ne se trouvent pas dans les autres poissons, lesquels organes sont pourvus de gros nerfs au moyen desquels ils sont en relation avec le cerveau. Ces organes ne paraissent être, d'après les expériences de M. Matteucci sur la torpille, que le réceptacle de l'électricité produite dans le quatrième lobe du cerveau ; on peut détruire effectivement les trois premiers sans enlever le pouvoir électrique au poisson, tandis qu'il le perd en détruisant ce lobe.

Les poissons électriques se servent de l'agent électrique élaboré dans le cerveau comme d'une arme défensive et offensive. Il pourrait se faire cependant qu'une semblable élaboration eût lieu dans les corps organisés vivants, pour remplir des fonctions essentielles à la vie, telles que la formation des sécrétions, la digestion, etc.

Il existe, au reste, dans les animaux des courants électriques qui viennent à l'appui de cette opinion. Les effets de ces courants ont été signalés la première fois par Galvani (p. 26); on les produit dans une grenouille nouvellement préparée, en mettant en contact le muscle crural avec le nerf lombaire; l'animal se contracte aussitôt. Nobili a prouvé que l'effet était dû à un courant électrique dirigé du muscle au nerf, lequel a été appelé *courant propre des animaux*. M. Matteucci a mis en évidence l'existence de ce courant dans l'animal vivant. En variant les expériences, il a trouvé que chacun des membres d'une grenouille, du moins chaque muscle, pouvait être considéré comme un élément électro-moteur complet. Il a montré effectivement, en 1841, que l'on obtenait le courant en mettant en contact la partie interne d'une cuisse avec la partie externe, et que l'on pouvait ainsi former une pile avec un certain nombre de muscles.

M. Dubois-Reymond, en 1842 (105), a fait une suite de recherches intéressantes sur le même sujet, avec un galvanomètre d'une extrême sensibilité; il a établi comme il suit la loi du courant dans un muscle, en supposant une coupe transversale et une coupe longitudinale : « Toutes les fois qu'un arc conducteur est établi entre un point quelconque de la coupe longitudinale du muscle, soit naturelle, soit artificielle, et un point également arbitraire de la coupe transversale, soit naturelle, soit artificielle, il existe dans cet arc un courant dirigé de la coupe longitudinale à la coupe transversale. » M. Dubois-Reymond a trouvé que cette loi s'appliquait également au courant nerveux, le nerf étant un électro-moteur comme le muscle; ce dernier fait a été découvert par lui.

Une question importante restait à résoudre, c'était de savoir si, pendant que l'animal se contracte, il y avait production d'électricité. M. Matteucci a mis ce fait en évidence sans en donner l'explication, en plaçant le nerf d'une grenouille rhéoscopique (moitié d'une grenouille préparée à la manière de Galvani) sur le muscle que l'on fait contracter par un moyen quelconque; le muscle de la grenouille rhéoscopique se contracte aussitôt. M. Matteucci avait attribué cet effet à un courant induit. M. Becquerel (106), en rendant compte de ce fait à l'Académie des sciences, avait annoncé qu'il était dû à une décharge électrique produite dans le muscle, laquelle irritait le nerf de la grenouille galvanoscopique. M. Dubois-Reymond a vérifié cette assertion en prouvant, à l'aide de

son galvanomètre, que pendant la contraction d'un muscle il y avait réellement production d'un courant. La découverte de cette propriété est d'une grande importance en physiologie.

M. Matteucci est le premier qui ait fait quelques essais pour mettre en évidence sur l'animal vivant le courant musculaire; mais, la grenouille sur laquelle il opérait n'étant pas intacte, il pouvait donc rester des doutes sur les résultats obtenus; M. Dubois-Reymond voulut éviter cette cause d'erreur en expérimentant sur l'homme, comme il suit : on plonge un doigt de chaque main dans deux vases remplis d'eau salée, en communication avec le galvanomètre très-sensible, au moyen de deux lames de platine. Vient-on à contracter tous les muscles d'un des bras, en ne mouvant pas les doigts, il se produit un courant dirigé du bras vers l'épaule. M. Becquerel a attribué la production de ce courant à la réaction, sur l'eau, de la transpiration subite qui a lieu sur les doigts par l'effet de la contraction, laquelle transpiration fournit un liquide acide, qui donne lieu à un courant dirigé dans le même sens, puisqu'on obtient le même effet en contractant le bras avant l'immersion. M. Dubois-Reymond a répondu à cette objection en disant que l'effet produit dans ce dernier cas n'est pas contraire à la doctrine qu'il professe, attendu que la cause qui engendre le courant musculaire persiste dans les muscles quelques temps après la contraction; M. Becquerel pense que cette raison de détruit pas son objection.

M. Donné, en faisant usage du même mode d'expérimentation que celui qu'il avait employé pour les végétaux, a trouvé que la peau de l'homme était positive relativement au liquide qui humecte la bouche, ainsi que l'estomac à l'égard du foie, etc. Tous ces effets sont dus aux réactions chimiques qui ont lieu par l'intermédiaire des tissus, entre les liquides différents qui humectent les organes.

§ V. *Electricité atmosphérique et phénomènes qui s'y rapportent.*

Au milieu du siècle dernier, on savait déjà (p. 9) que, dans les temps sereins, l'air possédait un excès libre d'électricité positive ; que cet excès était soumis toutes les vingt-quatre heures à des variations régulières d'intensité ; que, par les temps nébuleux et orageux, l'électricité était tantôt positive, tantôt négative, et quelquefois nulle, etc. On avait encore remarqué que l'excès d'électricité positive était assez faible peu avant le lever du soleil, qu'il

augmentait peu à peu avec le lever, puis rapidement, et arrivait ordinairement quelques heures après à son premier maximum. Cet excès diminuait d'abord rapidement, ensuite lentement, et arrivait à son minimum quelques heures avant le coucher du soleil; il recommençait à monter dès que le soleil s'approchait de l'horizon, et atteignait peu d'heures après son deuxième maximum, puis il diminuait jusqu'au lever du soleil.

Depuis, on a perfectionné les appareils et les moyens d'observation, de sorte qu'on a eu des déterminations plus précises. Aux électromètres de de Saussure et de Volta, Peltier a substitué celui de Rousseau (107), perfectionné par lui et pourvu de divers accessoires, qui l'ont rendu portatif et capable de donner des résultats exacts et toujours comparables. Cet électromètre est muni à sa partie supérieure d'une tige et d'une boule creuse de métal de $0^m,1$ de diamètre, avec laquelle on observe l'action par influence exercée par l'électricité de l'air. Quand on veut recueillir directement l'électricité, on enlève la boule, et l'on fait usage d'une pointe ou d'un faisceau de fils de platine.

En même temps que l'électromètre, on emploie aussi un galvanomètre à très-long fil parfaitement isolé, dont l'une des extrémités est en communication avec la tige d'un paratonnerre isolé, et l'autre avec le sol; cet appareil, toutefois, ne donne des indications que lorsque la tension électrique est considérable. On se sert également de cerfs-volants, de ballons captifs et de flèches lancées avec un arc, comme l'a fait M. Becquerel (108).

Schubler (109) de 1811 à 1812 a donné des tables d'observations qui ont servi à fixer les heures des deux maxima et des deux minima des variations diurnes. Arago a déterminé également les heures de ces maxima et de ces minima. Depuis cette époque, on s'est livré à des observations d'électricité atmosphérique dans presque tous les observatoires de l'Europe, notamment dans celui de Bruxelles, où M. Quetelet (110) a fait une etude spéciale des phénomènes de l'atmosphère, ainsi que dans ceux de Kew, de Munich, etc.; dans le premier de ces deux observatoires, M. Ronalds, dans le second, M. Lamont, se sont livrés à des observations suivies. M. Peltier (111) a fait également un grand nombre d'observations.

On a vérifié, comme on le savait avant, que dans les temps sereins, l'air était ordinairement positif, et que l'excès d'électricité positive allait en augmentant, en s'élevant au-dessus du sol.

M. Quetelet a reconnu que pour la même hauteur atmosphérique il y a deux maxima et deux minima dont les heures changent suivant les saisons, ce qui est assez d'accord avec les observations de de Saussure, qui n'a donné que des indications générales; il a déduit des nombreuses observations faites à Bruxelles que l'instant qui représente le mieux l'état moyen électrique de la journée, dans les différentes saisons, est onze heures du matin.

Les variations mensuelles ont occupé également les observateurs; nous mentionnerons seulement ici les résultats obtenus par M. Quetelet, et ceux déduits des observations de M. Ronalds, qui résument l'état de nos connaissances actuelles à cet égard:

1° L'électricité atmosphérique positive atteint son maximum en janvier et son minimum en juin. Le maximum et le minimum sont dans le rapport de 3 : 1.

2° Les maxima et minima absolus de chaque mois suivent une marche semblable à celle des moyennes mensuelles.

3° Dans le cours de l'année, l'électricité est plus forte quand le ciel est serein que lorsqu'il est couvert, excepté vers les mois de juin et de juillet. A partir de cette époque, la différence augmente d'autant plus qu'on approche davantage du maximum; le rapport est alors de 4 : 1.

Dans l'observatoire de Kew, des 15,170 observations recueillies dans une période de cinq années, 14,515 sont relatives à l'électricité positive, et 665 à l'électricité négative. En construisant graphiquement les courbes qui représentent ces observations, M. Birt (112) en a tiré les conséquences suivantes : la tension minimum de l'électricité atmosphérique paraît avoir lieu à deux heures du matin. La tension augmente ensuite graduellement jusqu'à six heures du matin, puis plus rapidement, et devient double à huit heures de ce qu'elle était à six heures. L'accroissement est alors plus gradué jusqu'à dix heures, époque du maximum du matin ; après quoi la tension diminue jusqu'à quatre heures, où elle n'est que très-peu supérieure à ce qu'elle était à huit heures. Ce deuxième minimum est le minimum diurne; la tension augmente ensuite rapidement jusqu'à huit heures du soir; ce maximum du soir est notablement plus fort que celui du matin. Entre dix heures et minuit, la tension diminue, et cette diminution continue jusqu'à deux heures du matin. M. Birt a déduit aussi des observations susmentionnées la période annuelle.

En ce qui concerne l'électricité négative, on a reconnu, en comparant les observations faites dans diverses localités, que lorsque

l'air possède cette électricité, il est tombé le plus souvent une pluie qui était en général abondante, et que les cas où il n'est pas tombé de pluie ont été très-rares.

En partant de l'électricité libre qui existe ordinairement dans l'air, on a pu expliquer facilement la grande tension électrique que possèdent les nuages orageux à l'instant de leur formation. Gay-Lussac (112') en a donné une explication très-rationnelle : à l'instant où un nuage se forme, l'air étant électrisé positivement, l'électricité libre se réunit en couches très-minces sur la surface de chaque globule vésiculaire ; le nuage devenant plus dense, les globules vésiculaires sont plus rapprochés, et il arrive un instant où il peut être considéré comme un conducteur continu : à ce moment, toute l'électricité qui se trouvait disséminée autour des globules est réunie à la surface du nuage qui, occupant un espace beaucoup moindre, possède une forte tension électrique et est orageux ; emportés par le vent, les nuages perdent ensuite leur électricité. Si l'électricité de l'air est positive, on a un nuage positif ; dans le cas contraire, il est négatif. Quant à la hauteur des nuages orageux, à leur couleur, à l'influence de l'électricité des nuages, à la formation des vapeurs, à celle des orages, à leur distribution sur le globe et à leurs effets, questions sur lesquelles on a encore beaucoup à dire, nous renvoyons aux ouvrages mentionnés dans la table (113).

Les causes qui produisent cette énorme quantité d'électricité qui se trouve dans l'air, surtout dans les temps d'orage, sont nombreuses et la plupart inconnues. Quelques-unes ont été indiquées pages 151 et 173, mais il en existe encore d'autres qu'on pense devoir intervenir. On a supposé que la distribution de la chaleur dans la terre et l'atmosphère devait donner lieu aussi à des effets électriques ; MM. Becquerel et Delarive ont exprimé cette opinion, mais on n'a encore acquis aucune preuve directe à cet égard. M. Delarive pense néanmoins qu'il faut chercher dans les vapeurs la cause de l'électricité atmosphérique. Les vapeurs qui s'élèvent de la terre doivent prendre effectivement à celle-ci de l'électricité négative qu'elles transportent dans l'air, laquelle sert à neutraliser une certaine portion d'électricité positive et à former des nuages négatifs.

Les paratonnerres ont reçu depuis Franklin, voir page 8, des perfectionnements successifs dus à des observations faites par les praticiens. En 1823, sur la demande du gouvernement, l'Académie des sciences invita la section de physique à rédiger une

instruction spéciale sur les paratonnerres; Gay-Lussac (114) fut chargé du rapport dans lequel se trouvent toutes les règles pratiques qui peuvent servir de guide. Depuis lors, l'électricité s'étant enrichie de découvertes importantes, et la nature des constructions ayant éprouvé des changements considérables, dans un grand nombre de cas, les métaux remplaçant le bois et la pierre, on a senti la nécessité de revoir les instructions de 1823. L'Académie des sciences fut appelée à s'occuper de nouveau de cette question, à l'occasion de la construction du Palais de l'Industrie; la section de physique fut chargée de préparer le travail, en le reprenant là où l'avait laissé Gay-Lussac. M. Pouillet fut choisi pour rapporteur (115). La plupart des nouvelles instructions que renferme le rapport n'étant pas encore sanctionnées par l'expérience, nous n'en parlerons pas ici. Nous mentionnerons encore les travaux de sir Snow Harris sur les paratonnerres à bord des navires, lesquels paratonnerres sont en usage maintenant en Angleterre.

M. Becquerel, dans cette période de l'histoire de l'électricité que nous exposons ici, a découvert les lois du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, lois qui ont donné un grand développement à l'électro-chimie, et dont le premier résultat a été le renversement de la théorie du contact de la pile, auquel a concouru si puissamment M. Delarive, par ses travaux, sa persistance et ses vues ingénieuses; M. Pouillet a analysé les effets électriques produits dans l'évaporation quand il y a décomposition chimique ou ségrégation; MM. Nobili, Matteucci et Dubois-Reymond ont découvert l'existence de l'électricité dans les muscles et les nerfs des animaux vivants quand ils fonctionnent ou dans ceux des animaux récemment tués.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE VII.

(1) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 93.

(2) *Philos. trans.*, vol. LXI, part. 1, p. 331. — Priestley, t. I, p. 407.

(2') Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 424.

(3) *Mémoires de l'Académie des sciences* pour 1769, histoire, p. 10, Mémoires, p. 407. — Priestley, t. II, p. 49.

(4) *Mémoires de l'Académie de Turin*, 1765, p. 31. — Priestley, t. II, p. 70.

(5) Biot, *Traité de physique expérimentale*, t. II, p. 354.

(6) *Mémoires de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève* t. VI, p. 174.

(7) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXVIII, p. 133.

(8) Becquerel, *Traité d'électricité*, t. V, 2e partie, p. 44. — *Annales de chimie et de physique*, t. LX, p. 261.

(9) *Archives de l'électricité*, *Genève*, t. V, p. 480.

(10) *Nov. commentar. reg. Gottingue*, 1777, t. I; *id.*, 1778 et 1779.

(11) *Journal général de France*, n° 9. — *Mémoires de l'Académie de Berlin*, t. XXXIV, p. 5, 1856. — *Dictionnaire de physique* de Gehler, t. III, p. 754, (1827).

(12) *Annal. der Poggend.*, t. XCXVIII, 1re p. 170 (1856).

(13) *Philosoph. Magazin.*, novembre 1840. — *Archives de l'électricité*, *Genève*, t. I, p. 145.

(14) *Archives d'électricité*, t. III, p. 369. — *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. X, p. 88.

(15) *Philos. trans. abriged.*, vol. X, p. 272, et vol. LII, partie 2. — Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 140 et 357.

(16) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. III, p. 91.

(17) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XVI, p. 53.

(18) *Idem*, *ibid.*

(19) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLII, p. 46. — Becquere et E Becquerel, *Traité d'électricité* en 3 volumes, t. III, p. 391.

(20) Hauksbée, *Physico medical. exper.*, p. 12. — Priestley t. I, p. 30 et 137.

(21) Priestley, t. I, p. 33.

(22) *Idem*, *id.*, p. 240.

(23) *Journal de physique*, t. LXXIII, p. 230. — *Ann. de phys. et de chim.*, 2e série, t. II, p. 59.

(23') *Ann. di fisica, chemica*, 1842. — *Archives de l'électricité*, t. II, p. 395.

(24) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLIV, p. 401 (1855).

(25) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XLIII, p. 1011.

(26) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 426.

(27) *Dictionnaire de physique* de Libes, au mot *Électricité*.

(28) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. V, p. 95, et t. VIII, p. 383.

(29) *Idem*, t. XXII, p. 1.

(30) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LVII, p. 337.

(31) *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. XLII, p. 2, (1734).

(32) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 344 et 422.

(33) *Annales de chimie et de physique*, t. LXI, p. 288. — Becquerel, *Traité d'électricité*, t IV, p. 70. *Idem*, *Traité de physique*, t. II, p. 173.

(34) Becquerel, *Traité d'électricité*, t. II, p. 94. — *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXIV, p. 337.

(35) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. II, p. 155.

(36) Haüy, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1785, p. 206.

(37) Dufrénoy, *Traité de minéralogie*.

(38) De Drée, *Traité de minéralogie* d'Haüy.

(39) *Annales de chimie et de physique*, t. XXXVII, p. 5 et 355.

(40) *Mémoires de l'Académie de Berlin*, pour 1843. — *Archives de l'électricité*, t. III, p. 585.

(40') *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XLII, p. 1264.

(41) *Annales de chimie et de physique*, t. XXII, p. 199.

(42) *Biblioth. univ.*, t. XXIII, p. 38 et t. XXIV, p. 253.

(43) *Idem*, t. XLVII, p. 351 et t. XLVIII, p. 1.

(44) *Annales de chimie et de physique*, t. XXIII, p. 131 ; t. XXXI, p. 371, t. XXXVII, p. 328 et t XLI, p. 353.

(45) *Biblioth. univ.*, nouv. série, t. XII, p. 211; t. XIII, p. 199 ; t. XV, p. 187 ; t. XVIII, p. 353. — *Archives d'électricité*, t. II, p. 207 ; t. III, p. 266. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XV, p. 541.

(46) *Annales de Poggendorf*, t. LXXXIII, p. 469. — *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t XXXIV, p. 105.

(47) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1850, et *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XVIII, p. 297.

(48) Poggend., *Annal. der physik.*, t. LXXXVIII, p. 374. — *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XVIII, p. 297.

(49) *Biblioth. univ. de Genève*, 1re série, t. XXXVII, p. 174 et 183. — Becquerel, *Traité d'électricité*, t. 1, 239.

(50) *Annales de chimie et de physique*, t. XXII, p. 375.

(51) *Bibiloth. univ. de Genève*, 2e série, 1840, t. XXX, p. 215. — *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXV, p. 333.

(52) *Biblioth. univ.*, 1re série, 1830, t. XXXVII, p. 119. — *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLVIII, p. 198.

(53) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LIII, p. 5.

(54) *Idem*, t. XXXI, p. 371.

(54') *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LIX, p. 113. — *Comptes rendus de l'Acad.*, t. I, p. 28. *Idem*, t. III, p. 771. *Idem*, t. VI, p. 429; t. XIII, p. 791. — *Annales du Muséum d'histoire naturelle.*

(55) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. IX, p. 613.

(56) *Annales de chim. et de phys.*, 2e série, t. XXXI, p. 371.

(57) *Idem*, t. LXX, p. 324.

(58) *Annales de chim. et de phys.*, 2e série, t. LVI, p. 371.

(59) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. III, p. 782.

(60) *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XI, p. 265.

(61) *Annales de chimie et de physique*, t. XXII, p. 358. — (62) *Idem*, t. XXIII, p. 135. — (63) *Idem*, t. XXIII, p. 244. — (64) *Idem*, t. XXIV, p. 192. — (65) *Idem*, t. XXIV, p. 337. — (66) *Idem*, t. XXV, p. 405. — (67) *Idem*, t. XXVI, p. 176. — (68) *Idem*, t. XXVII, p. 5 ; t. XXXVI, p. 328. — (69) *Idem*, t. XXVIII, p. 16. — (70) *Idem*, t. XXXV, p. 401. — (71) *Idem*, t. XXXVI, p. 328. — (72) *Idem*, t. XXXVI, p. 5.

(73) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. XI, p. 908.

(74) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXVIII, p. 1012, et t. XXXIX, p. 231.

(75) *Annales de chimie et de physique*, t. XXXIX, p. 297.

(76) *Transactions philosophiques* (1840) ; *Archives de l'électricité*, Genève, t. I, p. 93 (1841). — Faraday, *Experiment. research., electricity.*

(77) *Comptes rendus de l'Académie des sciences* (1835), t. 1, p. 455. — Becquerel, *Traité d'électricité* en 7 vol., t. III, p. 292, et t. V, 2e partie, p. 215.

(78) *Annales de chimie et de physique*, t. XLIII, p. 425.

(79) Becquerel, *Traité d'électricité*, t. I, p. 176, et *Journal de physique*, 1821 ; *Lettre d'Ampère à Van Beeck.*

(80) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVIII, p. 218..

(81) Becquerel, *Traité d'électr.* en 7 vol., t. III, p. 107, et t. V, 2e part., p. 12 et suiv.

(82) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. VII, p. 741; t. XVI, p. 846.
(83) *Philosophical Magazine*, t. XIV, p. 129 (1839), et t. XXI, p. 417.
(84) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVII, p. 385.
(85) *Ann. de Pogg.*, t. LXVII, p. 497, et *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XX, p. 184.
(86) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XX, p. 217. — *Annales de Poggendorf*, t. LV, p. 55.
(87) *Annales de Poggendorf*, t. XC, p. 42, et *Archives des sciences physiques de Genève*, 3e série, t. XXVII, p. 322.
(88) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVIII, p. 215.
(89) *Comptes rendus de l'Académie*, t. XXII, p. 677.
(90) *Idem*, t. IX, p. 145.
(91) *Idem*, t. XIII, p. 198, et *Bibliothèque universelle de Genève*, 2e série, t. XXXV, p. 136.
(92) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXII, p. 451. — *Idem*, t. XXV, p. 447. — *Idem*, t. XLII, p. 81.
(93) *Idem*, t. XXXII, p. 176.
(94) *Annales de chimie et de physique*, 1re série, t. LVII, p. 398.
(95) *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XXIII, p. 36, 301, 379
(96) *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XV, p. 301.
(97) *Communication du 26 mai 1850 à l'Institut des sciences de Venise.*
(98) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLI, p. 198.
(99) *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. XLIII, p. 1101, et Becquerel et E. Becquerel, *Traité d'électricité*, t. II, p. 173.
(100) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLI, p. 438.
(101) *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. I, p. 242
(102) *Biblioth. univ. de Genève*, 1839, t. XXIV, p. 387.
(103) *Archives de l'électr.*, t. V, p. 496.
(104) *Biblioth. univ.*, t. II, p. 392; t. XII, p. 163; t. XVII, p. 37. — *Archives de l'électricité*, t. I, p. 571; t. V, p. 491. — *Annales de chimie et de physique*, t. XXI, p. 160.
(105) *Annales de Poggendorf*, janvier 1843.
(106) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. V, p. 788
(107) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXII, p. 422.
(108) *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. I, p. 242.
(109) Becquerel, *Traité d'électricité*, en 7 vol., t. IV, p. 8 et suiv.
(110) *Mémoires de l'Académie de Bruxelles*, 1849-1854. — *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XI, p. 177, et t. XXVII, p. 5.
(111) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 385. — *Archives de l'électricité*, t. IV, p. 170. — *Observ. sur la formation des trombes*, in-8, Peltier.
(112) *Archives des sciences physiques*, t. XII, p. 224.
(112¹) Gay-Lussac, *Annales de chimie et de physique*, 1re série, t. VIII, p. 158.
(113) *Traité d'électricité et de magnétisme*, de MM. Becquerel, t. I, p. 385 à 449. — *Mémoires* de Peltier.
(114) *Annales de chimie et de physique*, t. XXVI, p. 258.
(115) *Idem*, 3e série, t. XLIII, p. 432.

CHAPITRE VIII.

Propagation de l'électricité. — Piles voltaïques.
Depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle.

---

§ I. *Conductibilité électrique. — Résistance.*

On a vu, page 10, que Priestley est le premier qui ait essayé de déterminer le pouvoir conducteur des métaux pour l'électricité, en faisant passer la décharge d'une batterie électrique chargée au même degré, à travers deux fils de métal différent de même longueur et de même diamètre ; celui-là qui était le plus fusible était le moins bon conducteur. Ce procédé était trop imparfait pour donner des résultats exacts. M. Harris en 1817 (1) a fait également usage de cette méthode.

Davy, en 1821 (2), voulut résoudre la question à l'aide de l'électricité voltaïque ; sa méthode, analogue à la précédente, consistait à prendre des fils de différents métaux, de même longueur et de même diamètre, et de chercher combien chacun d'eux pouvait décharger de couples voltaïques à la Wollaston ; c'est à l'aide de ce procédé très-imparfait qu'il a avancé que le pouvoir conducteur paraissait être en raison inverse de la longueur, et à peu près en raison directe de la masse. Il n'annonçait rien de précis ; il ne pouvait en être autrement, cette méthode ne comportant aucune exactitude.

Depuis cette époque, l'emploi du multiplicateur a donné plus de précision aux méthodes expérimentales ; M. Cumming (3) s'est servi des courants thermo-électriques pour comparer le pouvoir conducteur des métaux.

M. Becquerel, en 1825 (4), a traité le même sujet en employant le galvanomètre différentiel qu'il a imaginé à cette occasion (voir page 79). Les appareils à courants constants n'étant pas encore connus, ce galvanomètre lui a permis de mettre les résultats à l'abri des variations d'intensité de la pile, et de les rendre indépen-

dants des effets particuliers qui ont lieu au passage d'un fil métallique à un autre; c'est à partir de ce travail qu'il a été possible de comparer rigoureusement ensemble les pouvoirs conducteurs des différents métaux.

Le galvanomètre différentiel qui est généralement adopté aujourd'hui, est un multiplicateur à deux fils dans les circuits duquel on peut faire passer deux courants électriques en sens contraire, soit que ces courants proviennent de deux sources électriques, soit de la division du courant d'une même source; on conçoit facilement qu'on peut, en amenant l'aiguille au 0, considérer les deux courants partiels comme égaux. En plaçant dans chaque circuit partiel, d'un côté un fil métallique étalon auquel on compare les autres, de l'autre côté un fil quelconque d'un autre métal, en allongeant ou raccourcissant les fils jusqu'à ce que l'aiguille du multiplicateur se maintienne au 0, on peut juger alors quelles sont les longueurs des fils métalliques qui sont équivalentes en conductibilité. M. Becquerel a pu démontrer rigoureusement par cette méthode la loi de la conductibilité énoncée plus haut, savoir que les pouvoirs conducteurs sont proportionnels à la section des fils et en raison inverse de leur longueur, à égalité de nature bien entendu, loi qui montre que les courants électriques se transmettent dans l'intérieur des fils métalliques de molécule à molécule, et non pas suivant leur surface. Dans le même travail il a donné un tableau des conductibilités comparatives des métaux; il a de plus démontré rigoureusement ce fait, que dans un circuit fermé parcouru par un courant électrique, l'intensité du courant est la même dans tous les points du circuit.

Depuis cette époque, cette question a été étudiée à différentes reprises, surtout après que Ohm, en 1827, eut établi la loi remarquable dont nous parlerons plus loin et qui règle l'intensité d'un courant dans une pile d'après la nature des éléments qui la composent et la conductibilité de ces éléments. Dès lors on a introduit dans la théorie de la conductibilité l'élément qu'on a nommé *résistance à la conductibilité*, ou simplement résistance, et qui est une quantité inverse du pouvoir conducteur: mais les tableaux des pouvoirs conducteurs comparatifs servent à déduire immédiatement les résistances comparées, en remarquant que, pour chaque corps, le produit de la résistance à la conductibilité par le pouvoir conducteur est une quantité constante; il est donc indifférent de déduire des expériences telle ou telle de ces quantités dénommées.

MM. Barlow et Christie (5) ont aussi traité ce sujet, le second en se fondant sur les phénomènes d'induction. M. Pouillet (6), en faisant usage de couples thermo-électriques égaux et de la boussole différentielle, a étudié les pouvoirs conducteurs des différents métaux; il a fait voir que la présence des matières étrangères altère singulièrement la conductibilité, et que dans le cuivre l'écrouissage a pour but de la diminuer d'environ 1 millième de sa valeur. Il a montré que pour les liquides comme pour les métaux, le pouvoir conducteur suit les mêmes lois, et qu'il est proportionnel à la section de la colonne liquide que transmet le courant, et en raison inverse de sa longueur; M. Fechner, en 1831, avait déjà vérifié cette loi. M. Pouillet, en comparant les pouvoirs conducteurs des métaux et des liquides, a montré que la dissolution aqueuse de sulfate de cuivre conduisait environ 16 millions de fois moins bien l'électricité que le cuivre lui-même.

Depuis les travaux de M. Becquerel en 1825, on a comparé les pouvoirs conducteurs ou les résistances des métaux, à l'aide des longueurs d'un fil étalon auquel on a rapporté les conductibilités des autres fils, et on en a conclu les résistances d'après la loi des longueurs et des diamètres indiquée plus haut. Pour atteindre ce but, les physiciens ont construit des appareils à l'aide desquels la comparaison des longueurs de fils étalons, en cuivre, en argent ou en platine, a été obtenue avec plus de précision et surtout de facilité qu'en employant simplement une règle divisée; M. Pouillet a disposé de cette manière différents instruments.

M. Wheatstone (7) a proposé, sous le nom de *rhéostat*, un appareil destiné à atteindre le même but, et qui permet d'interposer dans un circuit une longueur variable d'un fil métallique, soit pour comparer les conductibilités, soit pour comparer les courants d'une pile voltaïque, comme nous l'indiquerons plus loin. Cet appareil consiste en deux cylindres portant un pas de vis sur leur surface et destinés à enrouler le fil de comparaison ou fil étalon; ce fil est enroulé primitivement sur l'un d'eux, qui est métallique, et on le déroule à volonté avec la main sur le second cylindre, qui est en bois ou en matière isolante, de sorte que la quantité qui se trouve enroulée sur ce dernier représente la longueur variable du fil étalon introduit dans le circuit. Cet appareil, qui est simple, a le désavantage de ne permettre d'opérer qu'à la température ordinaire, et de faire varier la tension du fil étalon; pour des expériences précises, il faut disposer des rhéostats, soit en plaçant les fils longitudinalement et main-

tenant leur température constante, soit en opérant avec des liquides, et cela suivant le genre d'expériences à faire.

Ces considérations ont guidé M. E. Becquerel, qui a repris en 1846 (8) dfférentes questions relatives à la mesure des pouvoirs conducteurs des solides et des liquides. Il s'est servi du galvanomètre différentiel et de rhéostats divers, mais en prenant toutes les précautions nécessaires pour que les résistances à la conductibilité soient déterminées avec toute l'exactitude qu'exigent les recherches scientifiques. En comparant les métaux entre eux, il a trouvé que les différences provenant de la température et de l'écrouissage, étaient telles que le métal auquel on devait rapporter les conductibilités était l'argent pur recuit: c'est celui que l'on est toujours plus certain de préparer avec le plus de pureté et le plus facilement; le mercure serait très-convenable, mais comme il conduit environ cinquante fois moins bien que l'argent, il exigerait des longueurs de colonnes liquides trop grandes pour la comparaison des conductibilités des autres métaux.

Il a montré entre quelles limites la conductibilité d'un métal varie avec l'écrouissage. Quand la température s'élève, le métal conduisant de moins en moins bien l'électricité, ainsi que Davy l'avait reconnu, sa résistance augmente; il a déterminé pour chaque métal cette augmentation de résistance, et la quantité qu'il a nommée coefficient d'augmentation de résistance à la conductibilité; ces coefficients, qui ne sont pas en rapport avec la dilatation du fil, indiquent que la chaleur agit par une action propre en changeant la faculté conductrice des particules métalliques.

M. E. Becquerel a appliqué la même méthode à la détermination des conductibilités des liquides, en divisant également le courant provenant d'une source voltaïque en deux circuits partiels, le premier passant dans un fil métallique étalon en platine, le second dans un liquide renfermé dans une colonne cylindrique en verre dont on faisait varier la longueur à volonté; ces deux courants partiels agissaient en sens inverse sur l'aiguille aimantée de la boussole différentielle à l'aide des deux fils de cette boussole, de sorte qu'en allongeant le fil de platine ou la colonne liquide, on ramenait toujours l'aiguille au 0. D'un autre côté, pour se mettre à l'abri des effets de polarisation des lames métalliques qui servent à transmettre les courants dans les liquides, M. E. Becquerel a introduit une seconde colonne liquide dans le circuit du fil de platine, de sorte qu'une fois le 0 atteint, il diminuait la longueur de la

deuxième colonne liquide, et augmentait celle du fil de platine du même circuit, jusqu'à ce que le 0 fût de nouveau atteint; il est évident que le second circuit partiel étant resté identique à lui-même, les courants électriques étaient non-seulement égaux entre eux, mais aussi égaux à ce qu'ils étaient au commencement de l'expérience; par conséquent les déterminations expérimentales ont donné les résistances à la conductibilité, abstraction faite de la polarisation, perte au passage, etc., ce qui n'avait pas été fait antérieurement.

Après avoir comparé par cette méthode les résistances d'un certain nombre de dissolutions, il a montré que pour une partie d'entre elles le pouvoir conducteur augmente à mesure que la substance saline entre en plus grande proportion dans le liquide; il y en a d'autres qui offrent un maximum de conductibilité, et alors une plus grande concentration donne lieu à une diminution dans la faculté conductrice. L'action de la chaleur sur la conductibilité des liquides s'exerce en sens inverse de celle qui est produite sur les solides; au lieu de diminuer la conductibilité, elle l'augmente dans une proportion beaucoup plus forte et qui a été déterminée.

Des recherches nombreuses ont été faites en outre sur les pouvoirs conducteurs des solides et des liquides par M. Riess, qui a fait usage, comme Priestley et Harris, des effets d'électricité statique; par MM. Lenz, Marié (9), Matteucci (10), Marianini, Wartmann, Hanckel, Mousson (11) : ce dernier a cherché à montrer que la loi du diamètre ne s'appliquait pas rigoureusement; mais, si l'on a égard au changement moléculaire que l'écrouissage apporte dans les fils, que l'on déduise le diamètre par les poids et la densité du métal, et que l'on mette les fils dans les mêmes conditions physiques, on vérifie cette loi, comme Davy et M. Becquerel l'ont établi dans leurs expériences.

Nous devons ajouter encore que MM. Kirchhof (12) et Smaasen (13) ont étudié la propagation des courants dans des conducteurs non linéaires et dans des plaques métalliques, et que MM. Faraday, Beetz, Hittorf, Buff, etc., ont cherché les pouvoirs conducteurs que certaines substances solides acquièrent à différentes températures, et principalement à l'état de fusion.

Si un certain nombre de corps solides et liquides laissent circuler l'électricité à travers leur masse, les gaz à la température ordinaire sont rangés parmi les corps mauvais conducteurs; aussi les pôles d'une pile isolée et placée dans l'air conservent-ils leur excès de

tension, si celle-ci n'est pas suffisante pour donner des étincelles : cependant il semblerait, d'après une observation faite, il y a quelques années, par M. Page (14), que l'air humide peut conduire légèrement l'électricité. Mais si la température des gaz s'élève, alors ils n'agissent plus de même et peuvent devenir conducteurs.

L'action de la flamme sur les corps électrisés a été remarquée par Gilbert (15) ; dans son ouvrage, après avoir rappelé les actions attractives exercées par l'ambre et plusieurs pierres frottées, il dit que, près des flammes, les corps frottés perdent leur faculté attractive. Depuis, cet effet a été confirmé par les physiciens qui répétèrent ces expériences ; au milieu du siècle dernier Winkler, puis Watson (16), démontrèrent que la flamme conduisait l'électricité, et Canton (16'), que l'air chaud jouissait de la même faculté. Plus tard, Bennet et Volta (voir page 11) se servirent de cette propriété pour augmenter la sensibilité des électroscopes employés dans l'étude de l'électricité atmosphérique.

Mais c'est Erman (17) qui le premier a montré, ainsi qu'on l'a déjà vu page 53, que les flammes conduisent l'électricité voltaïque ou à faible tension ; il a même trouvé une inégalité d'action dans les conducteurs qui touchent aux deux pôles, puisque, dans la plupart des flammes, un conducteur touchant au pôle positif d'une pile isolée est déchargé complétement, tandis que le pôle négatif acquiert son maximum d'action. Avec la flamme du phosphore l'inverse a lieu. MM. Andrew (18), Becquerel (19), ont étudié des effets du même genre.

Suivant M. Riess (19') la conductibilité de la flamme est due à des filets de vapeur mélangés à l'air chaud et terminés en pointes, lesquels facilitent l'écoulement de l'électricité ; quant aux corps qui brûlent sans flamme, leur conductibilité serait due aux pointes qui se forment sur le corps en combustion. Mais cette explication ne saurait être exacte, les expériences que nous allons rapporter ayant montré que les gaz, à une haute température, acquièrent la faculté de conduire l'électricité, même à une faible tension.

M. E. Becquerel (20) a prouvé, comme il suit, qu'il en était ainsi : il a tendu dans l'axe d'un tube en platine et parallèlement à sa direction un fil de platine, mais de façon que le fil ne touche pas le tube ; il a élevé la température de ce dernier sur une partie de sa longueur, puis, après avoir renfermé un gaz dans le tube, il a attaché les deux extrémités d'un circuit voltaïque composé d'un ou plusieurs couples et d'un multiplicateur, au fil et au tube ; il a

trouvé alors que, si le gaz interposé entre le fil et le tube est au-dessous de la température rouge, aucun courant ne passe au travers de l'intervalle; mais que si leur température atteint le rouge naissant, à partir de cette limite, ils transmettent d'autant mieux l'électricité que leur température s'élève davantage. Cette propriété est générale pour tous les fluides aériformes. M. E. Becquerel a montré, en outre, quelle était l'influence de la force élastique du gaz, de la température, de la nature du gaz, et de l'étendue comparative des électrodes, pour transmettre les courants électriques.

Ce passage de l'électricité au travers des gaz ne peut s'expliquer que par la conductibilité des molécules gazeuses ou par des décharges, à l'aide des molécules enlevées des conducteurs; après avoir discuté les deux hypothèses, M. E. Becquerel a émis l'opinion que le phénomène avait lieu par conductibilité comme à travers les solides et les liquides. Du reste, le phénomène des décharges obcures montrent que dans certaines conditions le passage de l'électricité s'effectue comme par voie de conductibilité au milieu des gaz.

§ II. *Action par influence; transmission des décharges électriques.*

L'action par influence qui a lieu entre un corps électrisé et un corps à l'état naturel placé à distance, ne s'opère pas sans que la substance intermédiaire ne prenne un certain état de polarité; si cette substance était non conductrice d'une manière absolue, alors, toute action venant à cesser, le corps primitivement à l'état naturel cesserait d'être influencé et deviendrait neutre; mais tel n'est pas l'état habituel, les corps ayant une conductibilité propre à l'aide de laquelle la transmission d'une faible quantité d'électricité peut s'opérer. La déperdition dans l'air sec de l'électricité des corps électrisés, fixés à des tiges de gomme laque ou de verre, tient en partie à cette cause; elle indique que les particules matérielles ne sont isolantes que pour des tensions électriques très-faibles, et qu'elles acquièrent le pouvoir de conduire l'électricité pour de plus fortes tensions; néanmoins la résistance à la conductibilité des gaz est énorme, par rapport à celles des liquides et surtout des métaux.

Dans le siècle dernier, la propagation lente de l'électricité dans le verre et dans les corps mauvais conducteurs a été le sujet de discussions; elle fut admise par Wilson et par Œpinus (20[1]); du reste, l'expérience remarquable de Franklin (20[2]), relative à l'analyse de la bouteille de Leyde, et dans laquelle il prouva par la sépa-

ration des garnitures, que la charge réside sur le verre, et les expériences (20[2]) d'après lesquelles on observa qu'une même bouteille pouvait donner successivement diverses décharges, indices des résidus d'électricité, devaient indiquer la pénétration de l'électricité à une certaine profondeur dans le verre. Il n'est pas sans intérêt de rappeler également à cette occasion les expériences curieuses de Canton (20[4]) sur des boules en verre formant condensateurs, électrisées intérieurement, puis scellées par la fusion du verre : l'électricité se conservait pendant un temps fort long, et se manifestait au dehors quand le verre devenait bon conducteur en le chauffant, tandis que cette électricité ne se perdait que très-lentement dans les conditions ordinaires, par une communication lente dans le verre. Ainsi il n'existe aucun corps isolant d'une manière absolue; il n'y a que des différences dans le pouvoir conducteur de leurs molécules.

Coulomb (21), lors de ses recherches sur les lois qui régissent les attractions et répulsions électriques, reconnut la nécessité de déterminer la quantité d'électricité que perdait un corps électrisé par l'air plus ou moins humide et par les supports; il fit cette détermination à l'aide de la balance de torsion, et arriva à cette conséquence générale, qu'un support d'une longueur quadruple isole une quantité double d'électricité.

Dans la théorie de Poisson sur l'équilibre de l'électricité à la surface des corps, on a vu que l'on avait supposé que l'électricité libre n'était maintenue sur les corps que par la pression de l'air; il est plus probable que l'air agit, jusqu'à un certain point, à la façon des corps non-conducteurs, comme le soufre et la gomme laque, par la masse de ses particules et non par sa pression, car dans le vide de nos machines, les corps chargés d'une certaine quantité d'électricité peuvent rester ainsi sans qu'il y ait déperdition : en effet, les expériences de Boyle, d'Hauksbée (22), de Gray, de Dufay (23), ont montré que les corps électrisés attirent les corps légers aussi bien dans le vide que dans l'air. Mais, comme il s'agissait de corps non conducteurs, on pouvait penser qu'ils restaient chargés d'électricité en vertu de la non-conductibilite de la matière; les expériences de M. Harris (24) et celles de M. Becquerel (25) ont montre que, dans le vide de nos machines, un électroscope chargé ne perd pas toute son electricité.

Lorsqu'un corps électrisé agit à distance sur un corps à l'état naturel, l'action par influence a lieu par l'intermédiaire du milieu

qui les sépare; M. Faraday (26) a étudié ces actions et a déduit de ses recherches étendues que les corps solides présentaient des différences dans leur pouvoir *inducteur*, c'est-à-dire, quant à la manière dont l'induction se manifeste à distance, et conséquemment relativement à la quantité plus ou moins grande d'électricité par influence développée par l'intermédiaire des corps isolants solides ou liquides; quant aux gaz, ils ont offert les mêmes effets, ou le même pouvoir inducteur, quelle que soit leur pression. M. Harris et M. Belli sont arrivés à la même conclusion que M. Faraday.

M. Matteucci (27) n'a pas expliqué de la même manière les effets produits : il a attribué la différence entre les effets d'induction observés avec les corps solides à ce que l'électricité se propage dans la masse jusqu'à une petite profondeur, et cela différemment, suivant la nature du corps et sa température. D'après ses recherches, l'action par influence aurait lieu de la même manière dans les différents corps, quoique par une polarisation des particules intermédiaires, et il n'y aurait pas de différence dans leur pouvoir inducteur, mais seulement dans leur pouvoir isolant plus ou moins grand.

Depuis les recherches de M. Faraday, M. Riess (27') a étudié d'une manière spéciale le développement d'électricité par influence, principalement dans les condensateurs. Il a montré que les résultats des expériences ne confirmaient pas l'explication du condensateur admise jusqu'ici, et dans laquelle le corps isolant ne jouerait qu'un rôle purement passif, et qu'il fallait tenir compte de l'influence de cet isolant; il en a déduit une nouvelle théorie du condensateur en rapport avec les faits observés.

Les recherches de M. Faraday, comme celles de M. Harris, sont venues confirmer les idées de Wilson et d'Œpinus, savoir, que les corps isolants possèdent des propriétés conductrices faibles mais sensibles; quant au pouvoir isolant plus ou moins grand des gaz, il peut être apprécié par les résistances aux décharges électriques, comme l'ont fait voir MM. Faraday, Matteucci et Masson (28) en montrant que les gaz présentent des effets bien différents; cette résistance à la décharge paraît être en rapport avec la quantité de particules placées sur le passage de l'électricité.

D'après ces différents travaux, il y a deux modes de propagation de l'électricité dans les corps : propagation par voie de conductibilité, de molécule à molécule, et qui peut avoir lieu dans les solides, les liquides et les gaz; propagation par voie de décharge avec disjonction des molécules placées sur le passage de l'électricité.

La propagation de l'électricité dans certains corps médiocres conducteurs, et principalement dans les huiles, a été mesurée par M. Rousseau, à l'aide d'un électroscope qu'il a nommé *diagomètre* (29) ; dans cet appareil, la force répulsive exercée entre une tige fixe isolée, horizontale, électrisée, et une aiguille mobile, est contre-balancée par l'action que la terre exerce sur une petite aiguille aimantée fixée à l'aiguille mobile ; il a trouvé, par exemple, qu'une charge électrique mettait 40 minutes à porter l'aiguille à la déviation maximum quand l'électricité traversait l'huile d'olive, tandis qu'en opérant avec l'huile de pavot, elle ne mettait que 27 secondes.

Nous avons déjà parlé, page 53, des observations d'Erman, et précédemment, page 191, nous avons cité les effets obtenus avec les flammes ; mais, si nous n'insistons pas ici sur les différences que présentent les corps dits unipolaires, c'est qu'il est possible que ces différences ne proviennent que d'effets secondaires, dus à ce que les réactions chimiques produites par l'électricité apportent sur les conducteurs des éléments isolants qui donnent lieu aux effets observés.

Lorsque l'électricité s'écoule à la surface des corps, suivant leur nature, leur mode de cristallisation, elle ne passe pas avec une égale facilité dans toutes les directions ; ce sujet a été étudié par M. Wiedeman (30) et M. de Senarmont (31) ; le premier de ces physiciens s'est servi de poussière de lycopode ou de minium, dont il recouvre la surface des corps à étudier, et, en électrisant une pointe en contact avec la surface, la poudre s'écarte uniformément ou inégalement autour de la pointe, suivant que l'on opère avec un corps amorphe ou cristallisé ; d'après la différence d'écartement, on en déduit la plus ou moins grande facilité de dispersion, suivant la surface.

M. de Senarmont était arrivé en même temps que M. Wiedeman à des résultats du même genre, mais en employant un autre procédé d'expérimentation : la surface à étudier était recouverte d'une lame d'étain dans laquelle était découpée une ouverture circulaire ; on plaçait le tout sous la cloche d'une machine pneumatique, et l'on amenait une pointe fixée à la partie supérieure de la cloche de façon à toucher la surface au centre de l'ouverture de la lame d'étain ; en électrisant la tige métallique avec l'électricité positive, et opérant dans l'obscurité, l'électricité s'échappait dans des directions dépendant de la position des axes optiques des cristaux avec lesquels on opérait. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a des différences dans la propagation de l'électricité à la surface des corps

cristallisés suivant des directions qui sont liées à la position des axes de ces cristaux.

On peut se demander si ces expériences intéressantes sur la conductibilité superficielle conduisent à admettre une conductibilité intérieure, ou propre, de la substance dans les mêmes proportions? C'est ce que l'on ne peut affirmer ; car si les cristaux rudimentairs, lors de leur groupement, présentent des angles dans une certaine direction, il est certain que ces saillies, invisibles à l'aide des appareils, faciliteront l'écoulement de l'électricité dans cette direction. On ne peut cependant s'empêcher de reconnaître qu'il y a une liaison intime entre les propriétés optiques des minéraux et ces phénomènes, d'autant plus que M. Knoblauch (32) a observé que des cristaux suspendus entre les pôles de piles sèches prenaient une direction déterminée comme entre les pôles d'un aimant, résultat qui semble montrer une disposition à la production de phénomènes d'électricité par influence plus faciles dans certaines directions que dans d'autres.

Dans toutes les recherches faites sur la propagation de l'électricité dans les gaz, il est très-remarquable qu'il y ait une différence due à la nature de l'électricité ; en effet, M. Belli (32') a montré que, dans l'air et dans les gaz, l'électricité négative se dissipait plus rapidement que l'électricité positive ; MM. Faraday et Matteucci ont prouvé qui si les gaz avaient le même pouvoir inducteur, leur résistance à la décharge électrique était différente, et que pour un même gaz les effets dépendaient de la grosseur des boules entre lesquelles les décharges éclataient, et qu'il n'était pas indifférent que la plus petite boule fût positive ou négative. En général, dans l'air, la perte de l'électricité négative est plus rapide que celle de la positive. D'un autre côté, MM. Wiedeman et de Senarmont ont constaté, dans les recherches citées plus haut, que les différences observées ne pouvaient être obtenues qu'à l'aide de l'électricité positive ; M. de Senarmont a vu qu'avec les cristaux, l'électricité négative donnait une propagation uniforme comme avec les corps amorphes : cet effet ne proviendrait-il pas de ce que la plus grande facilité de propagation de cette électricité s'oppose à l'observation des différences observées ?

§ III. *Vitesse de l'électricité.*

On a vu, chapitre 1er, page 6, que dans les premiers temps de la découverte de la bouteille de Leyde, on chercha à s'assurer si la vitesse de transmission de l'électricité à une certaine distance pouvait être appréciée ; mais, malgré la longueur des conducteurs, on ne put observer aucun intervalle de temps appréciable entre l'instant de la fermeture d'un circuit électrique à l'une des extrémités de ce circuit et celui où l'effet était produit à l'autre extrémité. Ce n'est qu'en 1834 (33) que M. Wheatstone essaya de déterminer la durée d'une étincelle électrique et de trouver la vitesse de propagation de l'influence électrique dans un conducteur métallique.

M. Wheatstone fixa un miroir tournant à un axe auquel il pouvait communiquer une vitesse de 600 à 800 tours par seconde, et il disposa son appareil pour examiner les étincelles éclatant entre deux ou plusieurs conducteurs après leur réflexion dans le miroir; il annonça alors que les étincelles paraissaient des lignes continues d'après leur durée, qui était appréciable, et que le retard que la décharge d'une bouteille de Leyde éprouvait à passer dans un fil conducteur donnait aux images des étincelles produites aux extrémités de ce fil conducteur, des positions obliques permettant de calculer la vitesse de transmission de l'influence électrique d'après la vitesse de rotation du miroir. Il arriva alors à cette conclusion, que la vitesse de propagation de l'électricité dans un fil de cuivre était comparable à celle de la lumière, et devait être de 460,000 kilomètres par seconde.

Plus tard, l'établissement de lignes télégraphiques permit de disposer de longs circuits isolés dans l'air, et de pouvoir estimer le temps que mettait un courant électrique à parcourir une étendue déterminée en opérant sur deux fils réunis de façon à former un seul circuit, dont les extrémités étaient près l'une de l'autre, et à produire une même action physique ou chimique à ces deux extrémités. M. Walker (34), en 1849, s'occupa de cette détermination en Amérique, et plus tard M. Mitchel et M. Gould. Ils trouvèrent des nombres bien inférieurs à ceux de M. Wheatstone, c'est-à-dire 25,000 kilomètres, 45,000 et 30,000 kilomètres par seconde, au lieu de 460,000 kilomètres. En 1850, M. Fizeau et Gounelle, en France (35), puis MM. Guillemin et Burnouf, trouvèrent, par une autre méthode, en faisant passer des courants

interrompus, 180,000 et 100,000 kilomètres. Depuis, les astronomes de l'observatoire de Greenwich et d'Édimbourg trouvèrent un nombre beaucoup moindre que ceux de M. Walker, c'est-à-dire 12,000 kilomètres, et avec le fil allant de Londres à Bruxelles, dont une partie est sous l'eau, on a trouvé seulement 4,300 kilomètres par seconde.

Le peu de concordance entre ces résultats peut être expliqué au moyen des actions par influence observées dans les fils télégraphiques souterrains et sous-marins et étudiées par M. Faraday (36); il est démontré, en effet, que lorsque les fils conducteurs isolés viennent à être mis en communication avec les pôles d'une pile, l'action par influence exercée sur les corps conducteurs placés à proximité, tels que l'eau ou le sol, s'ils sont plongés dans l'eau ou dans la terre, et tels que les poteaux, les fils voisins et les corps qui sont à proximité, permet à l'électricité de s'accumuler à la surface des fils comme dans des condensateurs, et il en résulte un retard dans les actions exercées de la part des fils parcourus par ce courant sur une aiguille aimantée. C'est ainsi qu'en comparant deux fils d'une longueur de 2,400 kilomètres, l'un plongé dans l'eau, l'autre dans l'air, M. Faraday a trouvé que le courant électrique a mis deux secondes pour traverser le premier d'un bout à l'autre, ce qui donnerait seulement 1,200 kilomètres par seconde à la vitesse de l'électricité, tandis que pour le second le temps a été inappréciable.

Ainsi, tout en admettant que la propagation de l'électricité est excessivement rapide, et que dans la télégraphie électrique elle peut être négligée, cependant ce sujet mérite d'attirer l'attention des physiciens, et il serait à désirer que de nouvelles expériences fussent faites, non-seulement à l'aide de la méthode de M. Wheatstone, mais encore par les autres procédés qui ont été proposés pour bien connaître l'influence des effets d'induction du courant sur lui-même et ceux qui sont dus aux conducteurs voisins, car cette question n'est pas encore suffisamment élucidée.

§ IV. *Piles voltaïques.*

Depuis la découverte de la pile, on avait cherché à modifier ce précieux instrument de façon à en rendre l'emploi plus facile et à en augmenter de beaucoup les effets tout en maintenant la constance de la production de l'électricité. On a vu, en effet, pages 34 et 52, que Cruikshanks et Wollaston avaient donné des formes plus

commodes à la pile de Volta. Mais ces appareils avaient les mêmes inconvénients que la pile voltaïque primitive et présentaient les mêmes causes de diminution d'intensité du courant, c'est-à-dire la polarisation des lames (voir page 169) par le transport des gaz et des métaux lors de l'action électro-chimique exercée par le courant sur le liquide de la pile.

Depuis 1820, la pile a été bien modifiée, surtout depuis que l'on connaît les différentes circonstances de la production de l'électricité et l'influence de la nature des substances qui entrent dans la composition des couples; on possède, en outre, des moyens d'obtenir des effets d'une puissance remarquable. Deux travaux qui marquent dans l'histoire de la pile ont contribué à ce résultat, et sont venus compléter l'immortelle découverte de Volta : le premier est celui de Ohm, publié en 1827, travail tout théorique, mais dont les résultats ont été démontrés plus tard par les expériences des physiciens, et qui fixe les idées sur l'influence de la conductibilité des éléments constituants des couples et sur les lois du dégagement de l'électricité; le second est celui publié par M. Becquerel, en 1829, travail tout expérimental, qui, en montrant les causes de la diminution de l'intensité du courant d'une pile, permit de le rendre constant au moyen des piles dites à deux liquides ou à *courant constant*. Mais, comme il arrive toujours, il s'est passé près d'une dizaine d'années avant que ces travaux, suffisamment connus, aient été appréciés des physiciens. Nous allons faire connaître successivement l'ensemble de ces deux travaux, les recherches qui s'y rapportent, et les conséquences qu'ils ont eues pour la science de l'électricité.

Zinc amalgamé. On doit d'abord parler, par ordre de date, de la propriété singulière que possède le zinc amalgamé de n'être que très-faiblement attaqué par l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, propriété signalée pour la première fois par H. Davy en 1826. Davy s'est borné à signaler ce fait, et en outre que le zinc amalgamé est positif par rapport à du zinc pur, sans en tirer aucune conséquence; c'est M. Kempt (37) qui le premier a fait usage du zinc amalgamé dans la construction régulière des appareils voltaïques. Bien que l'explication de l'effet produit ne soit pas encore complétement satisfaisante, cependant l'emploi de cet amalgame dans les piles donne lieu à un courant électrique plus énergique qu'avec du zinc ordinaire (environ 2 à 4 centièmes en plus); en outre, les appareils ne fonctionnant pas, ou du moins à peine, quand

le circuit n'est pas fermé, on est certain que l'on utiliserait la totalité de l'électricité qui est fournie par l'action chimique exercée de la part du liquide sur le zinc amalgamé, comme la théorie l'indique, si dans la pratique on n'avait pas reconnu une légère différence due à ce que le zinc amalgamé est même très-légèrement altéré sans que le circuit soit fermé. L'action des autres acides que l'acide sulfurique sur le zinc amalgamé est différente, car celui-ci peut être altéré dans certains cas avec dégagement de gaz; mais, comme on fait usage habituellement d'acide sulfurique, on voit qu'en somme la substitution de cette matière au zinc employé comme élément altérable des couples est un perfectionnement très-important apporté à la pile.

Théorie de la pile. — Courants dérivés. Ohm (38) a publié, en 1827, à Berlin, un mémoire sur la théorie mathématique de la pile de Volta, dans lequel il a tenté de faire pour l'électricité dans la pile ce que Fourier, Laplace, Poisson, Ampère, avaient fait pour la chaleur, l'électricité statique et l'électricité dynamique; si les bases sur lesquelles il s'est fondé, comme on va le voir, ne sont pas à l'abri d'objections, puisqu'il a adopté la théorie du contact de Volta et que la théorie chimique est celle qui rend compte de tous les faits connus, cependant la formule qu'il a donnée, et qui représente l'intensité du courant de la pile ainsi que les intensités des courants dans des fils partiels qui unissent simultanément ses pôles, ont été vérifiées par expérience et adoptés par tous les physiciens.

Ohm a adopté *à priori* les lois fondamentales suivantes :

1° Il admet que lorsque deux éléments matériels de même dimension sont en contact, mais inégalement électrisés, ils tendent à se mettre en équilibre électrique, ce qui a lieu dans un temps très-court et s'effectue proportionnellement à la différence des forces électroscopiques ou des tensions électriques qu'ils possèdent et à la longueur du temps;

2° La perte d'électricité qu'éprouve dans un temps donné un corps plongé dans l'air est proportionnelle à la quantité de cette électricité, et à un coefficient qui dépend de la nature du corps : Coulomb avait déduit cette conclusion de ses recherches;

3° Quand deux corps hétérogènes sont en contact, il existe au point où ils se touchent une force électroscopique constante et égale à la différence des forces qui leur sont propres : c'est la tension électrique ou force *électro-motrice.*

En partant de là, Ohm a cherché à établir les conditions aux-

quelles est soumis le mouvement de l'électricité dans les corps de forme et de nature quelconque, et les équations différentielles auxquelles elles conduisent sont semblables à celles que Fourier et Poisson ont données pour le mouvement de la chaleur.

Il a d'abord considéré le cas d'un anneau homogène, d'épaisseur constante, et dans une section duquel existe une tension électrique ou une inégalité dans les états électriques de deux surfaces consécutives ; il en a déduit la distribution dans l'anneau tout entier. Ensuite il est passé au cas d'un anneau hétérogène, et enfin à une pile formée par la réunion de parties prismatiques où sur chaque surface d'excitation il y a un saut subit qui produit une force électro-motrice, et dans toutes les parties de laquelle il y a un passage successif et uniforme d'électricité. Il en a déduit différentes expressions, mais entre autres la formule simplifiée suivante :

$$I = \frac{E}{R},$$

I étant l'intensité du courant de la pile, E la somme des forces électro-motrices et R la somme de toutes les résistances à la conductibilité. Cette formule signifie que dans une pile la « grandeur ou l'intensité du courant est proportionnelle à la somme de toutes les forces électro-motrices de la pile et en raison inverse de toutes les résistances du circuit, y compris celle de la pile. » Ohm nommait aussi la somme des résistances R, la *longueur réduite* du circuit, c'est-à-dire la longueur divisée par le produit de son coefficient de conductibilité et de la section de toutes les parties du circuit.

Cette loi s'applique aussi bien à une pile d'un élément qu'à une pile d'un nombre quelconque d'éléments. Ohm (39) a déduit également de sa théorie les intensités relatives des courants électriques de circuits multiples qui joignent les pôles d'une pile, c'est-à-dire les lois des courants dérivés ; il a montré que les intensités relatives de ces courants étaient en raison inverse des résistances à la conductibilité des circuits.

Les recherches faites par Ohm pour vérifier sa théorie n'étaient pas suffisantes ; l'expérience seule pouvait décider si ses formules s'appliquaient aux appareils voltaïques, d'autant plus que le troisième principe sur lequel il s'est basé est hypothétique, et ne saurait être admis aujourd'hui, où il est généralement reconnu qu'il faut un travail moléculaire physique ou chimique pour engendrer l'électricité, et non le simple contact de deux corps.

M. Pouillet (40), dès 1828, sans avoir eu connaissance des travaux de Ohm, s'occupait d'établir directement par l'expérience les conditions diverses du dégagement de l'électricité dans les piles ; en effet, dans la détermination des pouvoirs conducteurs, il signalait la nécessité de tenir compte de la mesure de l'intensité du courant et de la résistance à la conductibilité de la pile, et les deux mémoires qu'il a publiés sur ce sujet en 1831 (41) et en 1837 (42) établissent expérimentalement d'une manière nette et complète la loi du dégagement de l'électricité dans les piles thermo-électriques et hydro-électriques. C'est à l'occasion de ces recherches qu'il décrivit la boussole des tangentes.

M. Pouillet présenta son premier mémoire à l'Académie des sciences le 3 octobre 1831, mémoire qu'on ne connut que par les extraits qui ont été publiés dans son *Traité de physique* et dans le journal *le Lycée*. Il y a établi expérimentalement que le courant électrique d'une pile thermo-électrique « est en raison directe du nombre des éléments en activité, et en raison inverse de la résistance à la conductibilité du circuit total formé par les conducteurs métalliques qui constituent la pile et par le fil extérieur qui joint les pôles. » Il démontra, également par expérience, que, dans les circuits dérivés, les intensités des courants partiels sont en raison inverse des résistances de ces circuits. Plus tard, en 1837, il étendit ces lois aux courants provenant des piles à courant constant, c'est-à-dire des piles à deux liquides ; la démonstration expérimentale de la loi simple qui règle le dégagement de l'électricité dans la pile fut alors parfaitement établie.

M. Fechner (43) entreprit également d'établir expérimentalement les lois du dégagement de l'électricité dans les piles hydro-électriques; il publia son travail en mai 1831, et, sous ce rapport, il aurait l'antériorité de la publication sur M. Pouillet ; mais il fit usage dans ses recherches de piles simples, et les expériences faites avec ces appareils ne permettaient pas de comparer immédiatement les résultats obtenus, car les piles simple offrent trop d'incertitudes dans leur emploi, vu les effets complexes qui se produisent et la diminution rapide dans l'intensité du courant à mesure qu'elles fonctionnent ; ce n'est que par l'emploi des piles à deux liquides ou constantes, dont on va parler plus loin, et ainsi que l'a fait M. Pouillet, que les expériences purent acquérir la précision nécessaire. Aussi M. Fechner fut-il conduit à introduire dans la formule de la pile la *résistance* du courant au *passage* d'un solide

dans un liquide ou réciproquement, et il avança que dans une pile hydro-électrique l'intensité du courant, proportionnelle à la force électro-motrice, était en raison inverse de la résistance du circuit, augmentée d'une quantité variable qui représentait la résistance au passage.

Ohm n'admit pas l'existence de cette résistance spéciale. Les opinions furent alors partagées quant à l'explication des effets produits; et, si quelques physiciens on cru pouvoir expliquer les effets par une perte au passage, d'autres ne virent qu'une force électro-motrice inverse due à la polarisation des lames des couples simples, et qui, donnant lieu à un courant électrique inverse de celui de la pile, diminuait l'intensité du courant de celle-ci aussitôt que l'électricité commençait à circuler. Il y a plusieurs années, nous avons partagé la première opinion; mais toutes les recherches faites depuis, ainsi que les nôtres, montrent que les effets que l'on peut observer aux changements de conducteurs sont de l'ordre de grandeur qui n'influe pas sur les effets observés; dès lors, la seconde hypothèse, celle qui attribue l'écart des effets présentés par les piles simples de ceux qui seraient donnés par la loi fondamentale de la pile, à une force électro-motrice inverse fonction de l'intensité du courant au moment où celui-ci commence à passer dans le circuit, c'est-à-dire l'hypothèse qui attribue ces divergences à la polarisation des lames, doit être adoptée. On explique de la même manière les différents effets que présentent des diaphragmes métalliques interposés au milieu de conducteurs liquides, car leurs faces opposées se recouvrent de gaz ou de matières, et donnent lieu à des actions secondaires de polarisation analogues à celles dont il a été question pages 36 et 169.

Il résulte de là que le travail de M. Fechner, quoique très-intéressant au point de vue des effets des piles simples, ne pouvait servir à démontrer la loi de la pile; le travail de M. Pouillet, en 1837, a permis, comme on la vu, de l'établir nettement. Depuis, les travaux très-nombreux des physiciens sont venus confirmer les résultats obtenus; il nous suffira de citer, après Ohm, Pouillet et Fechner, MM. Poggendorf, Lenz, Delarive, Wheatstone, Despretz, Wartmann, E. Becquerel, etc.

M. Marié (43') a voulu montrer, d'après les écarts qu'il a observés en faisant usage de différents couples constants, que la loi précédente était en défaut; mais ces expériences n'infirment pas les résultats dont il vient d'être question, car rien n'indique qu'il n'y ait pas eu quelque effet de polarisation dans ses recherches, et que les

forces électro-motrices ou les résistances n'aient pas subi des changements pendant le cours des observations.

La loi de la pile est très-importante, car par son aide on peut se rendre compte de toutes les circonstances de l'intensité du courant, d'après la dimension des éléments, la résistance des couples et celle du circuit extérieur; seulement il faut remarquer que si l'énoncé de la loi, telle qu'elle est admise, indique que l'intensité du courant d'une pile est égale à la somme des forces électro-motrices, et en raison inverse de la somme des résistances de tout le circuit, composé de la pile et du circuit, on doit entendre par *force électro-motrice* la force en vertu de laquelle l'électricité passe dans le circuit, cette force ne dépendant pas du contact des métaux, comme le supposait Volta, mais bien de l'action chimique exercée par les liquides sur les métaux, et en général des réactions chimiques opérées dans l'intérieur des couples.

Piles à courant constant. En 1829 (44), M. Becquerel, tout en posant les principes de la diminution dans l'intensité du courant électrique dans les piles voltaïques, construisit des piles à courant constant; en rapportant plusieurs passages de son mémoire, le fait paraîtra parfaitement net. Il dit (page 23 du t. XLI des *Ann. de chimie et de physique*) : « ... La pile porte avec elle la cause des diminutions « qu'éprouve continuellement l'intensité du courant électrique ; car, « dès l'instant qu'elle fonctionne, il s'opère des décompositions et « des transports de substances qui polarisent les plaques de ma- « nière à produire des courants en sens inverse du premier : l'art « consiste à dissoudre ces dépôts à mesure qu'ils se forment avec « des liquides convenablement placés. On y parvient, etc. »

Même page, en parlant des couples à deux liquides séparés par une baudruche, il s'exprime ainsi : « Le maximum d'intensité s'ob- « tient sensiblement quand le cuivre plonge dans une dissolution de « nitrate de cuivre et le zinc dans une dissolution de nitrate de zinc. »

Enfin, page 24 : « Une pile construite suivant les principes que je « viens de faire connaître, c'est-à-dire dans laquelle chaque métal « plonge dans une case particulière qui renferme un liquide conve- « nable ; cette pile, dis-je, réunit toutes les conditions les plus favo- « rables, puisqu'on évite les causes qui peuvent nuire aux effets « électriques. »

Ainsi la disposition des couples, en plongeant chaque lame dans une dissolution différente, les deux liquides étant séparés par une cloison perméable, et en particulier la lame de cuivre se trouvant

dans un sel de cuivre, c'est-à-dire les couples de sulfate de cuivre, ont été employés par M. Becquerel depuis cette époque. Le sulfate de cuivre était décomposé par le courant de la pile lui-même, et la lame négative n'était pas polarisée, car l'hydrogène formé réduisait le sulfate de cuivre sur la surface de cette lame; du côté positif l'oxygène oxydait le zinc, on évitait la polarisation par les gaz et les autres corps provenant de la décomposition électro-chimique, et, les lames restant identiques à elles-mêmes, le courant était constant, pourvu que les liquides eussent la même composition et la même température.

M. Becquerel fit connaître aussi en 1835 l'appareil dont nous avons parlé page 168, et qui a été nommé *pile a oxygène;* dans cet appareil il a employé pour la première fois l'acide nitrique au pôle négatif de la pile, lequel dépolarisait la lame en lui enlevant à chaque instant l'hydrogène transporté.

Ces recherches, bien que connues des physiciens, ne furent pas appliquées pendant plusieurs années; en 1836 (45) M. Daniell fit connaître une pile qui n'était que la reproduction, sous une forme plus commode, de la pile découverte par M. Becquerel. Il se servit pour métaux de zinc et de cuivre, et les deux liquides, qui étaient de l'eau acidulée ou une dissolution de sulfate de zinc et une dissolution de sulfate de cuivre, étaient séparés par une forte baudruche formant un cylindre au lieu d'être une simple surface plane, comme dans l'appareil de M. Becquerel; en outre, en établissant avec un système de siphons une circulation du liquide qui attaquait le zinc, le liquide conservait la même composition et le même degré de concentration, et par conséquent la pile était constante.

D'après cela, la découverte de la pile à sulfate de cuivre a donc été inexactement attribuée à Daniell par plusieurs auteurs. Du reste, il est facile de citer ce qu'ont dit à ce sujet M. Pouillet en exposant en 1837 ses recherches sur la démonstration expérimentale des lois des courants dans les piles, et M. Grove en présentant à l'Académie des sciences de Paris la pile dont il va être question plus loin.

M. Pouillet s'exprime ainsi (46) : « Les piles qui ont été em-
« ployées de préférence sont les piles cloisonnées, dont le principe
« est dû à M. Becquerel; elles ont l'immense avantage d'avoir une
« force constante pendant des heures entières, etc. »

M. Grove (47) dit : « M. Becquerel a été le premier à se servir de
« celle-ci (d'une vessie) dans les cellules excitantes de l'auge, et
« par ce moyen il nous a donné le pouvoir de produire un courant
« constant en empêchant la précipitation mutuelle des métaux;

« avec une autre forme de diphragme, c'est-à-dire avec l'argile hu-
« mectée, M. Becquerel a produit ces résultats extraordinaires de
« cristallisation si universellement connus et d'une si grande impor-
« tance. M. Daniell aussi, par le moyen du diaphragme poreux, a
« beaucoup *amélioré* la construction des batteries voltaïques. »

La pile à sulfate de cuivre a été modifiée depuis cette époque, et, tout en lui donnant différentes formes, on s'est servi de divers diaphragmes, etc.; M. Becquerel, de 1836 à 1840, dans ses recherches sur le traitement électro-chimique des minerais d'argent, s'est servi de diaphragmes formés de planches, de toiles à voile, de porcelaine dégourdie, de plâtre, de creusets ordinaires, etc.

En 1839, M. Grove fit connaître à l'Académie des sciences de Paris une pile de petite dimension, mais dont la disposition était telle que sa puissance d'action était plus grande que celles qui avaient été employées jusqu'ici. Il se servit comme diaphragme perméable d'une tête de pipe, et plaça en dedans et en dehors différents liquides : d'abord de l'acide nitrique et de la potasse, comme dans la pile à gaz oxygène de M. Becquerel; puis des acides, et de chaque côté des lames de platine ou d'or, dans le but d'étudier les actions produites au contact des acides entre eux ; il substitua ensuite aux deux lames inoxydables, d'un côté une lame de zinc amalgamé plongée dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique, et de l'autre une lame de platine plongée dans l'acide nitrique, et il obtint un couple voltaïque d'une grande énergie. Dans cette disposition de couple, l'électricité dégagée résulte de l'action de l'eau acidulée sur le zinc amalgamé et de la réaction des deux dissolutions entre elles, et la lame de platine plongée dans l'acide nitrique se dépolarise continuellement, comme dans la pile à gaz oxygène faite antérieurement par M. Becquerel, parce que l'hydrogène naissant réduit l'acide azotique.

Quelques jours après la publication de la note de M. Grove, présentée à l'Académie des sciences de Paris par M. Becquerel, M. Grove vint au Muséum d'histoire naturelle, et, sous sa direction, il nous fut possible de faire monter une pile dans laquelle les têtes de pipes étaient remplacées par des vases cylindriques poreux en biscuit de porcelaine, et qui existaient au laboratoire depuis longtemps. On mit en dehors de chaque cylindre un vase d'eau acidulée par l'acide sulfurique au $\frac{1}{10}$ et un cylindre en zinc amalgamé, et dans le diaphragme de l'acide azotique et une lame de platine ; cette pile de 10 éléments présenta des effets calorifiques et chimiques très-

énergiques. Depuis cette époque, en France et en Allemagne, on a conservé cette forme cylindrique aux diaphragmes perméables de la pile de M. Grove; en Angleterre on a préféré les diaphragmes en terre poreuse et plats.

En 1843 (48), M. Bunsen envoyait à l'Académie des sciences la description d'une pile ne différant de celle de M. Grove qu'en ce que le conducteur en platine qui se trouve dans l'acide nitrique était remplacé par un conducteur en coke préparé. Le coke préparé, ou le charbon de cornue, comme on l'emploie maintenant, remplit la fonction de conducteur, et ne fait que rendre la dépense première d'une pile de Grove moins coûteuse; quant à l'effet produit, il est le même.

La pile à acide nitrique est de toutes les piles usuelles celle qui est la moins coûteuse, et qui donne les effets les plus énergiques; c'est pour ce motif qu'elle a été adoptée malgré l'inconvénient très-grand qu'elle présente, et qui tient aux émanations de vapeur nitreuse. Elle est considérée comme constante, mais, pour que cette condition soit remplie, il faut que la résistance à la conductibilité de chaque couple soit la même, et par conséquent que la température et la composition des liquides des couples reste fixe. Si donc on ne renouvelle pas continuellement les liquides des couples, l'action décroît au fur et à mesure que leur résistance à la conductibilité augmente; cette dernière est en effet l'élément essentiellement variable d'une pile. Quand on veut employer une pile moins énergique mais plus constante, on a recours à la pile à sulfate de cuivre, décrite plus haut.

Piles diverses. Avant que les piles à courant constant fussent connues, et même depuis, on a cherché à perfectionner la pile simple de Volta, déjà perfectionnée par Cruikshanks et Wollaston, soit pour en rendre l'emploi plus commode, soit en vue de produire des actions calorifiques énergiques; mais, bien que les appareils proposés aient été abandonnés depuis que l'usage des piles à sulfate de cuivre et à acide nitrique s'est généralisé, nous donnerons cependant quelques détails sur les appareils proposés.

Children, en 1815 (49), a construit une pile dont les éléments ayant chacun trente-deux pieds anglais de surface étaient capables des effets caloriques les plus puissants; ces effets tiennent à la faible résistance des couples due au rapprochement des lames et à leur grande surface, ce qui fait que l'intensité du courant est énergique, malgré que la force électro-motrice du couple soit plus faible que dans les piles à courant constant à deux liquides. Le déflagrateur que M. le

docteur Hare construisit en 1822 (50), ainsi que les piles en hélices proposées par M. Pouillet (51), ont conduit au même but; dans ces appareils, les lames sont disposées suivant des cylindres concentriques ou suivant une surface héliçoïdale, de manière à présenter de grandes surfaces sous un petit volume.

Plus tard, M. Faraday (52), en 1835, et M. Muncke (53), en 1841, d'après les dispositions qu'ils ont adoptées, ont fait voir que l'on pouvait plonger les couples d'une pile dans une même auge; d'après la très-grande différence de conductiblité existant entre les liquides et les métaux, l'effet était sensiblement le même que si chaque couple était dans une auge séparée.

En 1840, M. Smée (54) a indiqué une disposition de pile simple dans laquelle les deux métaux plongent dans un seul liquide, l'eau acidulée par l'acide sulfurique; mais la lame non altérable ne doit pas être polie, et doit avoir la surface rugueuse ; il a pris comme électrode négative du platine platiné; depuis, on a proposé d'y substituer du cuivre argenté, puis platiné. La supériorité d'action de ce couple sur les couples simples tient à ce que la polarisation qui a lieu sur le platine est plus faible et que le gaz hydrogène se dégage facilement de la surface négative; mais le courant n'est régulier que par suite de ce que la polarisation est rendue constante, car elle n'est pas détruite comme dans les piles à deux liquides. Cette pile, malgré l'inconvénient du dégagement de gaz hydrogène, peut être employée dans des opérations de galvanoplastie.

En 1844 (55), M. le prince de Bagration proposa une pile qui peut être utilisée pour les actions peu énergiques et de longue durée; cette pile consiste en lames alternatives de cuivre et de zinc, placées en terre ou dans du sable humecté avec une solution de sel ammoniac : sa résistance à la conductibilité est grande; mais, comme son action est assez régulière, elle peut être utilisée dans les actions lentes ou faibles; néanmoins, même dans ce cas, l'emploi de faibles couples à sulfate de cuivre est encore préférable.

En somme, ces différentes piles, qui ne sont que des modifications de la pile simple de Volta, ou piles à un liquide, sont soumises aux mêmes causes de diminutions d'intensité du courant et soulèvent les mêmes objections que les piles à auges ou à la Wollaston ; elles ne sont plus en usage actuellement.

M. E. Becquerel (55') a prouvé que non-seulement l'emploi de liquides réducteurs pouvait dépolariser l'électrode négative des couples, mais encore que l'on pouvait y parvenir par le mouvement de

l'électrode ou du liquide qui l'environnait; jusqu'ici le premier moyen a été seul employé et on n'a pu utiliser le second.

Il nous reste, pour terminer les différentes piles qui ont été décrites, à parler de deux formes de couples dans lesquels on ne se sert que d'un seul métal pour les deux électrodes, lesquelles plongent dans deux liquides différents séparés par une cloison perméable. Déjà, comme on l'a vu page 168, M. Becquerel avait montré dans la pile à gaz oxygène, qu'avec la potasse et l'acide nitrique et des lames de platine ou d'or de chaque côté, on avait un couple énergique.

M. Schœnbein (56), en 1842, construisit une pile dans chaque élément de laquelle du fer constituait les électrodes ; d'un côté, le fer plongeait dans de l'acide nitrique concentré, et, devenant alors passif, comme l'a observé pour la première fois Bergman (57), puis successivement différents physiciens et en particulier M. Schœnbein, formait le pôle négatif ; de l'autre, le fer plongeait dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique, et constituait le pôle positif ou métal oxydable ; les deux liquides étaient séparés par un vase poreux.

S. A. le prince Louis-Napoléon (58), sous la date du 23 avril 1843, annonçait à l'Académie des sciences qu'il avait construit une pile avec des lames d'un seul métal, le cuivre, et deux liquides différents, l'eau acidulée par l'acide sulfurique et l'eau acidulée par l'acide azotique, séparés par un diaphragme poreux ; ce dernier liquide attaquant seul le cuivre, l'autre lame était inactive, et il en résultait un courant électrique servant à démontrer que, dans la pile, le courant a une origine chimique et n'est pas dû au contact de métaux différents. L'exposé des principes en est fait avec une précision et une netteté remarquables.

Les effets observés dans ces circonstances viennent à l'appui de ceux qui ont été cités dans le chapitre précédent.

Force électro-motrice des couples. Dans les piles voltaïques à deux liquides ou à courant constant, comme dans les autres piles, l'étude des effets d'un couple doit seule préoccuper, puisque de la somme des actions produites on conclut l'effet de la pile entière. Examinons donc comment on a comparé les forces électromotrices des différents couples dont on peut faire usage.

Dans un couple, ainsi qu'on l'a vu, il y a deux sortes d'éléments à considérer : 1° la force *électro-motrice*, ou l'excès de tension en vertu de laquelle l'électricité passe dans le circuit, et qui résulte des actions chimiques diverses exercées dans le couple, et non pas du simple contact des métaux, comme le pensait Volta ; 2° *la*

résistance à la conductibilité, qui résulte uniquement de la somme des résistances des parties solides et liquides composant le couple. La première constitue l'élément constant, ou du moins à peu près constant, du couple, pourvu que les corps solides et liquides dont il est formé restent dans les mêmes conditions, puisqu'il n'y a pas de polarisation, ou du moins qu'on la suppose nulle; la seconde, forme l'élément essentiellement variable, car non-seulement la concentration des liquides fait varier à chaque instant la résistance à la conductibilité de la pile, mais l'influence de l'élévation de température due à la circulation de l'électricité est telle que pour 30 ou 40 degrés d'élévation de température la résistance est diminuée de moitié. Il importe donc, dans les couples à deux liquides, de connaître les causes qui font varier la force électro-motrice, car l'intensité du courant émis est directement proportionnelle à cette force; quant à la résistance, moins elle sera grande, plus l'intensité du courant augmentera, et il suffit de rappeler que c'est par l'augmentation de dimension des couples et le rapprochement des surfaces des lames, que Wollaston, Children, Hare, Pouillet, ont obtenu ce dernier résultat.

La force électro-motrice dans un couple à deux liquides résulte de trois effets : 1° de l'action chimique exercée sur le métal altérable, qui est le plus souvent du zinc amalgamé, et en vertu de laquelle le métal prend un excès d'électricité négative et le liquide actif un excès d'électricité positive ; 2° de l'action produite par les deux dissolutions agissant l'une sur l'autre ; 3° de l'action qui résulte de l'effet du conducteur négatif sur le liquide. Les deux premiers effets subsistent toujours; le troisième est souvent nul, comme lorsqu'il s'agit de la pile à acide nitrique ; mais si le conducteur négatif est recouvert d'un peroxyde, comme le peroxyde de manganèse ou de plomb, et ainsi que l'ont prouvé MM. Becquerel (59), Munck (60), puis MM. Delarive (61), Schœnbein (62) et Matteucci, alors l'effet électrique qui en résulte s'ajoute au courant produit par la réaction exercée sur le zinc, et l'intensité du couple est augmentée : tel est l'effet qui est produit dans les couples dont l'électrode négative est entourée de substances capables d'être ramenées à un état d'oxydation moindre.

La plupart des physiciens qui ont étudié la pile ont comparé les forces électro-motrices des différents couples que l'on peut former en changeant la nature des métaux et des liquides des piles à deux liquides: MM. Pouillet, Despretz, Delarive, Wheatstone (63), ont

employé la formule fondamentale de la pile de Volta pour déduire les rapports de ces forces ; MM. Fechner (64), Joule, ont introduit une résistance très-grande dans le circuit des couples, afin que, ces circuits pouvant être considérés comme égaux en résistance, les rapports des intensités électriques soient proportionnels aux forces électro motrices ; MM. Poggendorf (65), J. Regnauld (66), Gaugain (67), ont opposé au couple voltaïque et dans le même circuit un ou plusieurs couples dont la force électro-motrice était prise pour unité, afin de ramener l'action du circuit total à zéro ; M. E. Becquerel (68) a fait usage d'un procédé analogue à celui qui a été indiqué par M. Fechner, mais en mesurant l'intensité des courants à l'aide d'une balance électro-magnétique.

M. E. Becquerel a déterminé séparément les différents effets cités plus haut et dont la réunion constitue la force électro-motrice du couple, en mesurant les actions comparées que donnent les différents métaux altérables plongés dans divers liquides, et les effets que l'on obtient en substituant au sulfate de cuivre, à l'acide nitrique, au peroxyde de plomb et de manganèse, d'autres corps qui absorbent l'hydrogène, comme l'acide chromique (69), l'eau oxygénée, le chlore, etc. ; de sorte qu'on peut, par l'inspection des tableaux qu'il a insérés dans son travail, reconnaître les forces électro-motrices que peuvent donner les combinaisons d'un grand nombre de métaux et de liquides associés ensemble.

Parmi les métaux altérables d'un emploi ordinaire, le zinc amalgamé offre la plus grande force électro-motrice dans l'eau acidulée ; il n'y a que les métaux alcalins, comme le potassium ou le sodium, qui donnent des actions plus énergiques ; le fer, entre autres, ne donne à peu près que les $\frac{2}{3}$ des effets du zinc.

Dans ce chapitre, deux découvertes fondamentales dominent : 1° celle des lois de la conductibilité, entrevues par Davy, démontrées par M. Becquerel dans une portion de circuit, et étendues aux circuits dont les piles font partie, par MM. Ohm, Pouillet, Fechner ; 2° celle des principes des piles à courant constant, dus à M. Becquerel, et qui ont conduit à la pile à sulfate de cuivre employée pour la galvanoplastie et la télégraphie, et à celle à acide nitrique de M. Grove, rendue usuelle par M. Bunsen, et généralement en usage aujourd'hui.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE VIII.

(1) *Philosoph. Trans.*, 1817.—(2) *Journal de physique*, t. XCXIV, p. 226, 1821.

(3) *Philosophical Transactions*, 1823.

(4) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXII, p. 420. — Becquerel, *Traité d'électricité* en 7 vol., t. III, p. 71.

(5) *Philosophical Transact.*, 1833, 1re partie, p. 95.

(6) Pouillet, *Traité de physique*, 3e édit., t. II, p. 315 — *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. IV, p. 786.

(7) *Transact. philosoph.*, 1843, partie 2. — *Annales de chimie et de phys.*, 3e série, t. X, p. 257.

(8) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVII, p. 242.

(9) *Idem*, t. XIX, et t. XXII. — (10) *Idem*, 2e série, t. LXIII, p. 64.

(11) *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XXXI, p. 111 (1856).

(12) *Ann. der Pogg.*, t. LXIV, p. 497. — *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XX, p. 115 et 327.

(13) *Ann. der Pog.*, t. LXIX, p. 161, et t. LXXII, p. 435. — *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XX, p. 237.

(14) *Archives des sciences physiques de Genève*, t. IV, p. 64.

(15) Gilbert, *De magnete*, p. 46 et 66.

(16) *Philosoph. trans. abrigg.*, vol. X, p. 295.

(16[1]) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 219.

(17) *Annales de chimie*, 1re série, t. LXI, p. 113.

(18) *Bibliothèque universelle de Genève*, 2e série, t. VI, p. 158, 1836.

(19) Becquerel et E. Becquerel, *Traité d'électricité*, t. I, p. 95.

(19[1]) *Pogg. Ann.*, t. LXI, p. 545. — *Archives de l'électricité*, t. V, p. 91.

(20) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XXXIX, p. 355.

(20[1]) *Philos. trans.*, vol. LII, p. 485. — Priestley, t. II, p. 423 et 431.

(20[2]) Franklin, *Lettre quatrième.*, *traduc. franç.*, 4e édit., t. I, p. 25.

(20[3]) Priestley, t. Ier, p. 175. — (20[4]) *Idem*, t. II, p. 102.

(21) *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut*, 1785, p. 615. — Becquerel, *Traité d'électricité*, t. II, p. 157.

(22) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 26.

(23) *Mémoires de l'Académie des sciences de Paris*, 1734, t. LII, p. 341.

(24) *Philos. Trans.*, 1834. — Becquerel, *Traité d'électr.*, t. V, 2e partie, p. 122. — *Bibliothèque universelle de Genève*, t. XVII, p. 195.

(25) Becquerel, *Traité de physique*, t. I, p. 408.

(26) *Philos. Trans.*, 1838. — Becquerel. *Traité d'électr.*, t. V, 2e partie, p. 130.

(27) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVII, p. 133.

(27[1]) *Ann. Pogg.*, t. XXXVII et LXXIII. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XLII, p. 373.

(28) —*Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XXX, p. 5.

(29) *Idem*, 2e série, t. XXV, p. 373. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. IX, p. 701.

(30) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIX, p. 229.

(31) *Idem*, t. XXVIII, p. 257.

(32) *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XIX, p. 214.

(32') *Biblioth. univ. de Genève*, 2e série, t. XIII, p. 196.
(33) *Philosophical transac.*, 1836, 2e partie, p. 583. — *Archives de l'électricité de Genève*, t. II, p. 35.
(34) Silliman, *American journal of sciences*, 2e série, t. VIII, p. 142, 1849.
(35) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XXX, p. 139.
(36) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XLI, p. 123.
(37) *Journal philosoph. de Jameson*, décembre 1826.
(38) *Die galvanische kettemathem. bearb.*, Berlin, 1827. — *Jahr der chemie and phys.*, Schweigg., 1831 et 1832. — *Arch. de l'électr.*, t. I, p. 33. Genève, 1841.
(39) *Jahr. der chemie and physiq.*, Schweig., 1827. — *Bulletin des sciences mathématiques de Ferussac*, t. IX, p. 260.
(40) Pouillet, *Traité de physique*, t. I, 2e partie, p. 755, 1re édit., 1828. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences de l'Institut*, t. XX, p. 204.
(41) Pouillet, *Traité de physique*, 3e édit. — Becquerel, *Traité d'électr.* en 7 vol., t. V, 1re partie, p. 255. — *Journal* le Lycée, 6 octobre 1831.
(42) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. IV, p. 267.
(43) Fechner, *Massbetmimungen uber die galvanische kette.* Leipsig, 1831. — *Bulletin des sciences mathématiques de Ferussac*, mai 1831, t. XV, p. 279 — *Archives de l'électricité*, *Genève*, t. I, p. 45.
(43') *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XIX et XXII.
(44) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLI, p. 1 (1829).
(45) *Philosoph. Transact.* (1836).
(46) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. IV, p. 267.
(47) *Idem*, t. VIII, p. 567.
(48) *Idem*, t. XVI, p. 503. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. VII, p. 355.
(49) *Annales de chimie*, 1re série, t. XCXVI, p. 120.
(50) *Philosophical magazine*, t. LIX, p. 113 (1822).
(51) Pouillet, *Traité de physique.*
(52) *Trans. philos.*, 1835, — Becquerel, *Traité d'électr.*, t. V, 1re part., p. 300.
(53) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences* t. XIII, p. 584.
(54) *Biblioth. univ. de Genève*, t. XXVII, p. 186. *Lond. and Edimbourg Philos. Magazin.*, avril 1840.
(55) *Archives de l'électricité*, *Genève*, t. IV, p. 158.
(55') *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XLIV, p. 401.
(56) *Archives de l'élect.*, t. II, p. 286.
(57) *Philos. trans.*, 1790, p. 374. — Becquerel, *Traité d'élect.*, t. V, 1re part., p. 8.
(58) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XVI, p. 1180.
(59) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LX, p. 164 (1835).
(60) *Biblioth. univ. de Genève*, 2e série, t. I, p. 160 (1835).
(61) *Idem*, t. I, p. 152. — (62) *Idem*, *id.* p. 150.
(63) *Trans. philos.*, 1843. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. X, p. 277
(64) *Ann. de Poggendorf*, t. XLV, p. 232.
(65) *Idem*, t. LIV, p. 161. — *Annales de chimie et de physique*, 3e serie, t. VII, p. 87. — *Archives de l'électr.*, *Genève*, t. II, p. 1.
(66) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLIV, p. 453.
(67) *Comptes rendus des séances de l'Acad. des sciences*, t. XXXVIII, p. 628.
(68) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVIII, p. 200.
(69) *Arch. de l'électricité*, *Genève*, t. III, p. 124.

CHAPITRE IX.

Électro-chimie depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle.

---

§ I. *Effets chimiques dus à l'électricité. — Ses lois.*

Effets chimiques dus aux décharges. L'électro-chimie, qui traite des rapports entre l'électricité et les affinités, prit naissance aussitôt que l'on eut observé les effets de la foudre et la puissance de l'électricité pour enflammer les matières combustibles, fondre et volatiliser les métaux.

Avant la pile, on avait déjà remarqué, ainsi qu'on l'a dit page 14, que l'électricité était capable, non-seulement de décomposer les corps, mais encore d'opérer des combinaisons ; Cavendish, sur des indications de Priestley, mit en évidence la production des vapeurs nitreuses, pendant le passage de l'électricité dans l'air. On a vu, page 14, quelles avaient été les observations de Cavendish, de Volta, de Van-Marum, etc.

On montra ensuite qu'au moyen de l'eudiomètre, découvert par Volta, on obtenait avec du chlore et de l'hydrogène de l'acide chlorhydrique, avec de l'oxyde de carbone et de l'oxygène de l'acide carbonique, etc., etc. Parmi les physiciens qui se sont occupés de ce sujet, on peut citer Singer (1). L'eudiomètre a été perfectionné successivement par Gay-Lussac (2) et M. Regnault (2'), qui en ont fait un appareil donnant des résultats très-précis.

Paetz et Van-Troostwik, en 1790 (3), avaient décomposé l'eau en y faisant arriver de l'électricité ordinaire au moyen de deux fils d'or ; Cuthberson et Pearson obtinrent des effets analogues. Wollaston (4) avait décomposé l'eau et les dissolutions salines, en faisant arriver dans les liquides, par des pointes très-fines, l'électricité provenant de machines ordinaires. M. Faraday (5), ayant

repris les expériences, reconnut que l'on pouvait obtenir la décomposition de l'eau avec une lame de métal et un liquide, ou bien en substituant l'air au métal ou au liquide; il montra aussi que les sels pouvaient être décomposés par l'action des décharges, en disposant convenablement les appareils, pour qu'il se produisit dans la masse une circulation de l'électricité; ainsi l'électricité libre, en parcourant les dissolutions conductrices, agit de même que les courants.

M. Morgan (6), en 1799, était parvenu à décomposer l'alcool et les huiles, à l'aide des étincelles électriques; Davy avait obtenu également des décompositions du même genre. M. Melli (7) a repris ces recherches, et a émis l'opinion que ces effets chimiques de l'étincelle devaient être rapportés à l'élévation de température qui l'accompagne toujours. M. Grove (8) a fait voir que l'étincelle pouvait polariser les molécules des gaz, et MM. E. Fremy et E. Becquerel ont montré (9) que si, dans la plupart des cas, la décomposition chimique qui résulte de l'action des décharges est, pour ainsi dire, complète, il peut se produire des actions particulières et spéciales, comme nous le verrons en traitant de l'ozone, ou de l'oxygène possédant une propriété remarquable par l'effet des étincelles.

M. Masson (10), qui s'est occupé de la même question avec l'appareil d'induction de Ruhmkorff, a pris pour conducteurs polaires une tige en pointe et un conducteur de platine terminé en boule; la pointe est devenue le siége d'une décomposition abondante, tandis qu'on apercevait à peine sur la boule un dégagement des gaz. L'effet produit était dû évidemment à une différence de tension : le gaz recueilli à la pointe était un mélange d'oxygène et d'hydrogène, avec un excès de l'un ou de l'autre de ces gaz, suivant qu'elle était positive ou négative; quant à la boule, elle ne donnait que de l'oxygène ou de l'hydrogène, selon qu'elle était positive ou négative.

Du reste, nous rappellerons que lorsque l'électricité libre se propage dans les liquides, il se produit les mêmes effets de décomposition qu'avec les courants électriques, lesquels sont soumis aux mêmes lois que l'on indiquera plus loin; il n'y a de différence que dans la faible quantité d'électricité mise en jeu quand on opère avec l'électricité de tension.

Effets chimiques des courants. Les expériences faites depuis 1800, où Nicholson et Carlisle ont observé la décomposition électro-chimique de l'eau (Voyez page 30), ont mis en évidence les faits suivants :

1° Une dissolution aqueuse ou ignée n'est décomposée qu'autant qu'elle livre passage au courant;

2° Lorsque la décomposition a lieu, l'hydrogène, les métaux et les bases deviennent libres au pôle négatif, l'oxygène et les bases au pôle positif.

M. Faraday (11), dans ses travaux électro-chimiques, a découvert une troisième loi très-importante, c'est que les décompositions électro-chimiques ont lieu toujours en proportions définies; il l'a observée dans les conditions suivantes : lorsqu'on transmet un courant au travers de plusieurs dissolutions métalliques contenues dans des vases séparés, et placés à côté l'un de l'autre, mais communiquant ensemble au moyen de lames de platine, on trouve que les quantités de métal réduit sont proportionnelles aux équivalents de ces métaux.

Si l'on soumet au même mode d'action les sels métalliques fondus qui sont décomposés par l'électricité, on obtient les mêmes résultats.

La plupart du temps, quand on opère la décomposition électro-chimique des sels dissous dans l'eau, la réduction du métal au pôle négatif est le résultat d'une action secondaire due à l'hydrogène naissant: on dit alors que cette réduction est due à une action *secondaire;* dans ce cas, la quantité d'hydrogène dégagée étant en proportion définie avec les actions chimiques du même courant sur des corps fondus, la même loi s'observe.

On peut énoncer ainsi la loi qui régit ces décompositions en proportions définies : « Lorsqu'un courant électrique traverse une série de composés binaires, renfermant un équivalent de chacun des corps élémentaires, les quantités décomposées sont chimiquement équivalentes. »

Cette loi a été vérifiée par les travaux des physiciens, sauf les modifications qui vont être indiquées. M. Matteucci (12) étendit cette loi aux sels neutres, et chercha à démontrer qu'avec les composés organiques il en était de même. M. Daniell (13) a résolu la même question, par rapport aux composés binaires, tels que les sulfates de soude, de potasse, etc.; il a montré que si un courant électrique qui, dans un temps donné, produit le dépôt d'un équivalent de métal, passe dans une dissolution de ces sels, on observe simultanément au pôle négatif un équivalent d'hydrogène et un de soude ou de potasse, par ce motif qu'un seul équivalent de sulfate est décomposé, mais que l'hydrogène dégagé est dû à une action secondaire pro-

venant de ce que le potassium ou le sodium réduit par le courant décompose l'eau à froid; ainsi ce ne sont que les effets secondaires qui donnent lieu à une action décomposante double en apparence.

D'après les résultats précédents, on a pour mesure de la quantité d'électricité fournie par une pile, la quantité d'action chimique produite, soit sur l'eau, comme MM. Gay-Lussac et Thenard l'avaient employé les premiers (voir page 50), soit par la décomposition d'un sel métallique; l'appareil à décomposition porte alors le nom de *voltamètre*.

M. E. Becquerel (14), en 1844, a étudié les décompositions électro-chimiques en cherchant comment se comportent sous l'influence de l'électricité les composés ternaires et quaternaires, puisque, dans cette circonstance, un équivalent de métal se trouve uni à 2, 3, ou $\frac{1}{2}$ équivalent d'acide. Il a modifié comme il suit la loi énoncée plus haut : « Pour un équivalent d'eau décomposé dans un voltamètre, il se transporte au pôle positif, dans un appareil à décomposition qui se trouve sur la route du courant et qui contient une combinaison binaire ou ternaire, etc., un équivalent de l'élément acide ou électro négatif, et au pôle négatif la quantité correspondante de métal.»

Ainsi cette quantité peut être égale, ou double, ou la moitié, ou les $\frac{2}{3}$ de ce qu'indiquait la loi de M. Faraday, et c'est le corps qui se transporte au pôle positif qui fait loi, et non pas celui qui se porte au pôle négatif, comme on l'avait cru auparavant; ce dernier résultat n'a lieu que pour les composés binaires.

La conclusion suivante a également été déduite des recherches de M. E. Becquerel : « Lorsque le courant traverse en même temps une combinaison chimique binaire, et un mélange de deux ou plusieurs combinaisons binaires, la décomposition se fait toujours en proportions définies de manière que la somme des quotients obtenus en divisant le poids des éléments électro-négatifs déposés au pôle positif par leurs équivalents chimiques respectifs, est toujours égale au quotient du poids de l'élément électro-négatif déposé au pôle positif dans la combinaison binaire par son équivalent électrique.

En ayant égard aux résultats qu'il a obtenus, M. E. Becquerel a nommé équivalent électrique la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un équivalent d'une combinaison formée par la réunion d'un équivalent d'acide et de la quantité correspondante de base. Il a également déduit de ses recherches « que si un équivalent d'un corps, soit simple, soit composé, se combine avec un

ou plusieurs éléments d'un autre, si le premier joue le rôle d'élément électro-négatif ou d'acide dans la combinaison, le dégagement d'électricité qui résulte de leur action chimique est tel qu'il se produit toujours un équivalent d'électricité. » Ainsi la quantité d'électricité dégagée dans les actions chimiques ne dépendrait que du corps qui joue le rôle d'acide dans la combinaison. M. Magnus (14[1]) dans un travail récent très-intéressant a été conduit à des résultats analogues.

Les effets de la décomposition électro-chimique en proportions définies varient suivant la température, la nature du dissolvant et celle du composé dissous, et suivant la nature des électrodes et l'intensité du courant : c'est ce que les recherches de plusieurs physiciens ont montré. D'après ces mêmes motifs, comme M. E. Becquerel (15) l'a prouvé, les corps dissous aident à la décomposition électro-chimique de ce liquide.

Si plusieurs sels sont mélangés, l'action décomposante, tout en ayant lieu en proportions définies, ne se porte pas simultanément sur les deux sels : c'est sur le plus décomposable que l'action décomposante du courant s'exerce ; mais, comme l'a montré M. Becquerel (16), si l'on augmente la proportion de l'autre, l'influence de la masse se fait sentir, et le dernier sel peut être décomposé à l'exclusion du premier.

M. Faraday a reconnu que dans le dégagement des gaz provenant de la décomposition de l'eau, il y avait souvent proportionnellement plus d'hydrogène que d'oxygène ; cela provenait de la solubilité de ce dernier gaz, et on peut, en se servant de fils et d'une dissolution de potasse, diminuer cet effet et s'opposer à la disparition du gaz. Il se forme également de l'eau oxygénée au pôle positif, qui fait disparaître une partie du gaz en vertu d'une action secondaire; c'est ce que les expériences plus récentes de MM. Jamin, Leblanc, Soret, et celles de M. Meidenger (16[1]), ont montré.

MM. Daniell et Miller (17) ont signalé les premiers une inégalité de décomposition aux deux pôles de la pile. En séparant en deux parties, au moyen d'une membrane, un vase contenant de l'eau acidulée, qui est traversée par un courant faible, il ne se dégage pas de gaz, et l'acide est en excès au pôle positif. En substituant à l'eau acidulée des dissolutions salines de sulfate de cuivre ou de zinc, par exemple, le métal déposé au pôle négatif provient uniquement du sulfate qui se trouve dans la case où plonge cette électrode.

M. Pouillet (18) a fait des observations du même genre en opérant la décomposition d'une dissolution de chlorure d'or dans des tubes en U. MM. Hittorf (19) et d'Alméida (20), sont arrivés à des résultats semblables. Ce dernier a analysé les phénomènes dont il est question, et il est arrivé à montrer que, dans le cas où l'on observait des différences d'effets aux deux pôles, la réduction des matières provenait d'une action secondaire due à l'hydrogène naissant ; dans ce cas, l'eau était directement décomposée par le courant; dans d'autres, le sel seul était décomposé. Il a montré qu'avec les sels neutres, ce dernier effet était obtenu, mais que s'ils étaient même légèrement acides, l'eau était en général décomposée plus facilement que les sels. On comprend que si l'un et l'autre de ces effets ont lieu à la fois, c'est-à-dire si l'action décomposante se porte simultanément sur l'eau et le sel, on peut avoir des quantités inégales, mais variables, de décomposition aux deux pôles.

La loi de décomposition des liquides en proportions définies exige que toute l'électricité qui passe soit efficace pour les décomposer. M. Faraday, à l'origine de ses recherches, avait admis que des courants peuvent toujours être suffisamment affaiblis pour traverser l'eau sans la décomposer. M. Matteucci (21) montra qu'en augmentant la dimension des électrodes, on affaiblissait assez le courant électrique pour que l'iodure de potassium ne présentât pas d'iode au pôle positif. M. Foucault (22) a appuyé cette manière de voir; il en est de même de M. Despretz (23), qui a montré que de faibles courants pouvaient traverser pendant longtemps de l'eau sans que l'on eût apparence de décomposition. M. Masson (24) a émis une opinion du même genre, en montrant que l'électricité formée dans un appareil d'induction pouvait passer à travers l'alcool et faire bouillir le liquide, sans qu'il y ait trace de décomposition.

Mais il est un fait qui a été observé par M. Becquerel en 1846 (25), et qui consiste en ce que le moindre courant, la moindre décharge, même celle qui provient du frottement d'un bâton de gomme laque contre de la laine, suffit pour polariser les lames et leur donner le pouvoir de produire un courant en sens inverse du sens de la décharge, preuve de la présence des gaz oxygène et hydrogène provenant de la décomposition électro-chimique du liquide. Comment admettre la présence de ces gaz sans décomposition? Si les bulles gazeuses ne se dégagent pas, c'est que les gaz restent en dissolution, et de là se répandent de proche en proche jusque dans l'atmosphère ; ce fait ne nous paraît pas devoir être expliqué autre-

ment. M. Delarive, plus tard, est arrivé par une expérience analogue à la même conclusion; il en a été de même de M. Buff. Quoi qu'il en soit, et bien que cette dernière objection soit la plus sérieuse que l'on ait faite contre la conductibilité propre des liquides, on voit qu'en supposant même que cette conductibilité existe, et qu'il passe des traces d'électricité sans action efficace quand le courant est très-faible, ce fait n'infirmerait pas la loi des décompositions chimiques en proportions définies, car rien n'indique que l'effet dont il est question ait lieu au moment où l'intensité du courant devient suffisante pour passer en décomposant abondamment les combinaisons, et qu'à ce moment toute l'électricité n'agisse pas efficacement.

Nouvelle nomenclature électro-chimique. Quand une science fait de rapides progrès et qu'elle s'enrichit journellement de nouveaux phénomènes, on se trouve quelquefois dans la nécessité de modifier la nomenclature des expressions employées. C'est alors que des noms différents sont donnés à la même chose; il en résulte momentanément une confusion dont la science se débarrasse peu à peu, pour ne conserver que les noms qui expriment une idée et lui sont véritablement utiles.

Aussitôt que l'on eut découvert l'action décomposante de la pile, on appela *pôles* les fils ou lames de métal plongeant dans les liquides et servant à transmettre le courant; mais, comme cette dénomination était impropre, puisqu'elle ne présentait à l'esprit que de fausses analogies, soit qu'on la comparât à celle qui s'applique aux pôles d'un cercle soit à celle d'un aimant, Ampère proposa de les appeler *rhéophores* porte-courants.

D'un autre côté, quand on eut supposé une origine électrique aux actions chimiques, les corps déposés au pôle positif furent appelés *électro-négatifs*, les autres *électro-positifs*; ces dénominations, qui sont significatives, sont restées dans la science. La force déterminante qui opère la décomposition n'existe pas aux pôles, mais bien dans le corps décomposé, et, en considérant les pôles ou rhéophores comme les portes par lesquelles débouche le courant électrique dans le corps décomposé, M. Faraday les a appelés *électrodes*. Il désigne ainsi la surface d'air, d'eau, de métal ou de tout autre corps qui borne l'étendue de la matière décomposée dans la direction du courant. Il a appelé *anode* la surface sur laquelle se déposent l'oxygène et les acides; *cathode*, la surface par laquelle sort le courant; *électrolytes*, les corps soumis à la décomposition,

ions, les substances décomposées par le courant, et *cassions* les éléments qui se rendent à l'anode ou à la cathode.

Ces diverses dénominations ont été adoptées par les uns et rejetées par les autres; mais la plupart des physiciens ont conservé uniquement celles de *pôles*, de corps *électro-positifs* et *électro-négatifs*, de *rhéophores*, proposées par Ampère, et celles d'*électrodes*, d'*électrolytes*, proposées par Faraday; les autres n'ont pas été adoptées.

§ II. *Comparaison des quantités d'action chimique dues à l'électricité provenant de différentes sources. — Travail chimique des piles.*

M. Faraday (26) a comparé ensemble les effets produits par des décharges électriques et un couple voltaïque soit sur une aiguille aimantée, soit sur une dissolution; les résultats qu'il a obtenus lui ont permis d'évaluer approximativement les quantités absolues d'électricité unies aux particules des corps dans les combinaisons.

D'après cette comparaison, une quantité d'eau égale à $0^{gr},065$ exige pour sa décomposition un courant électrique continu pendant $3',75$, et capable de maintenir pendant ce temps à la température rouge dans l'air un fil de platine de $2^{mm},4$ de diamètre; or, quand on pense à la vitesse excessive de l'électricité, on doit en conclure que la quantité d'électricité qui passe pendant ce temps doit être excessive. M. Faraday a établi qu'il paraîtrait que 800,000 charges d'une batterie de quinze jarres de $2^{déc},032$ chacune de hauteur et de $0^{m},586$ de circonférence, seraient indispensables pour fournir l'électricité nécessaire à la décomposition de $0^{gr},065$ d'eau.

M. Peltier (27) a traité aussi cette question, mais avec des idées arrêtées sur la nature de l'électricité et ses rapports avec les affinités, idées qui ne sont pas généralement adoptées; il a transmis l'électricité à travers le circuit d'un multiplicateur, sans avoir pris les précautions nécessaires pour éviter les pertes. Les résultats auxquels il est parvenu sont plus considérables que ceux de M. Faraday.

M. Pouillet (28) s'est occupé également de la détermination de la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau, en prenant pour unité celle qui passe dans un circuit bismuth et cuivre, dont la longueur totale, sous le rapport de la conductibilité, est équivalente à 20^{m} d'un fil de cuivre de 1^{mm} de diamètre, et dont les deux soudures ont une différence de température

égale à 100°; il a donc rapporté les résultats à une unité d'électricité dynamique.

M. Becquerel (29), en suivant une méthode plus précise que les précédentes, a été conduit à des résultats qui donnent également une haute idée de la quantité d'électricité associée à la matière Cette méthode repose sur la polarité qu'acquièrent des lames d'or servant à la décomposition de l'eau. Ces lames se polarisent même quand elles servent à transmettre un courant thermo-électrique, ou une très-faible décharge d'électricité ordinaire; la question était donc de comparer ensemble les effets chimiques dus à l'action de la bouteille de Leyde et à celle du couple aux effets de polarisation obtenus; M. Becquerel a tiré de ses expériences la conséquence que pour décomposer 1 milligr. d'eau, il fallait 20,000 charges d'une batterie de 1 mètre carré, chargée de façon à donner une étincelle à une distance de 11^{mm},25. La quantité d'électricité associée à l'oxygène et à l'hydrogène dans un milligr. d'eau, laquelle, si l'on peut s'exprimer ainsi, représente leurs affinités réciproques, serait donc capable de produire tous les effets de la foudre.

On a proposé de comparer les effets des courants et des décharges au moyen de diverses unités dynamiques; M. W. Weber (29^{1}) a fait des recherches très-étendues sur cet important sujet : mais, comme les déterminations fondées sur les décompositions électro-chimiques sont très-simples et rigoureuses, elles ont été préférées jusqu'ici.

Travail chimique intérieur des piles. On a vu précédemment que l'action électro-chimique d'un courant était équivalente à la quantité d'action chimique donnant lieu au courant; cette loi est la plus simple que l'on puisse employer pour définir l'intensité d'un courant en indiquant quelle quantité d'action chimique peut être produite dans l'unité de temps sur un corps décomposé électro-chimiquement. C'est également le moyen de déterminer les quantités d'électricité qu'une pile peut produire, d'après le travail chimique intérieur ou extérieur qui se manifeste simultanément.

M. Despretz (30), en déterminant les différentes réactions qui ont lieu, est arrivé à la conclusion que le travail chimique extérieur est représenté à moins d'un centième près par le zinc dissous dans l'intérieur du couple. Il en est de même dans les piles composées d'un certain nombre d'éléments, avec cette condition que le travail chimique extérieur du voltamètre est équivalent au travail chimique de chaque couple pris isolément.

§ III. *Effets électro-chimiques divers.*

Réduction des métaux. Depuis la publication des travaux électro-chimiques de Davy, dont il a été question page 48, on s'est servi à plusieurs reprises de ses procédés pour la préparation des métaux : ainsi M. Bunsen (31), en prenant pour diaphragme un creuset de charbon, et s'aidant de l'action de la chaleur, a pu obtenir directement le manganèse, le chrome, le calcium et le barium. Quant au magnésium, il l'a produit en décomposant électro chimiquement le chlorure de magnésium fondu dans un creuset de porcelaine et chauffé au rouge (31 ').

M. Deville (32) a préparé l'aluminium avec le double chlorure d'aluminium et de sodium, maintenu à l'état de fusion, en prenant pour électrode négative une lame de platine, et pour electrode positive un cylindre de charbon; peu d'éléments suffisent pour obtenir ce métal.

Effets produits sur les composés organiques. M. Arthur Connel (33), en soumettant à l'action voltaïque des solutions alcooliques ou éthérées, et faisant usage du voltamètre, a été conduit aux résultats suivants :

1° L'eau qui entre dans la composition de l'alcool absolu est décomposée en ces deux éléments : l'oxygène devenu libre au pôle positif réagit sur l'hydro-carbure de l'alcool ;

2° En opérant sur la solution alcoolique d'un sel ordinaire, ce sel est décomposé électro-chimiquement : l'hydrogène se dégage, tandis que l'oxygène entre en combinaison ;

3° L'éther rectifié n'est pas décomposé même avec des courants puissants; il en est de même quand il tient en dissolution de la potasse. Des sels dissous ne produisent également aucun effet : cela tient à ce que l'ether ne contient pas, comme l'alcool, de l'eau pour principe constituant. L'ether saturé d'acide chlorhydrique fait exception : il se dégage au pôle négatif de l'hydrogène retenant un peu de vapeur éthérée; l'oxygène, au pôle positif, entre en combinaison.

Les effets produits dans les substances organiques dépendent de l'intensité du courant : si le courant est énergique, les substances sont entièrement décomposées; dans le cas contraire, leurs principes immédiats peuvent être séparés. Davy observa en effet, en soumettant à l'action voltaïque une feuille de laurier, que cette

feuille prit le même aspect que si elle eût été grillée, les éléments électro-négatifs étaient d'un côté, les éléments électro-positifs de l'autre.

Pelletier et Couerbe (34), en soumettant l'opium à l'action de courants d'une grande intensité, obtinrent au pôle négatif une substance soluble dans l'alcool; la dissolution soumise à l'évaporation donna des cristaux de morphine.

M. Becquerel (35), en soumettant de l'amidon à l'action d'un couple, a obtenu de la soude au pôle négatif; il en a été de même en opérant avec de la gomme arabique. Le mucilage de graine de lin ne donne que de la potasse; les graines, pendant le travail de la germination, donnent lieu à une réaction semblable.

En faisant passer un courant dans un mélange d'un volume d'eau et de deux volumes d'alcool, et prenant pour électrode positive une éponge de platine, il ne se dégage pas d'oxygène, ce qui n'a pas lieu avec un fil de platine; en opérant avec un mélange à volumes égaux d'eau, d'alcool et d'éther, on sent l'odeur d'éther acétique au-dessus de l'éponge; en soumettant à l'expérience d'autres mélanges, on arrive à cette conséquence que ce mode d'opérer peut être employé avantageusement pour étudier la nature des principes immédiats des substances organiques.

M. Gay-Lussac (36) a trouvé que, lorsqu'on fait arriver un courant au moyen de deux fils de platine dans du jus de raisin conservé à l'abri du contact de l'air, la fermentation ne tarde pas à s'établir; il en est de même d'une dissolution sucrée qui, sans l'action du courant, ne fermenterait de longtemps; on ne sait pas encore au juste comment agit l'électricité dans cette circonstance.

M. Colin a constaté que l'extrait de levure ou ferment soluble, qui ne s'altère pas sensiblement à l'air, dont la solution perd la propriété, après avoir été filtrée, de faire fermenter l'eau sucrée, la reprend en y faisant passer un courant. Il a reconnu (37), en analysant le phénomène, que la levure, dans un certain état, peut convertir en alcool ou en gomme la matière sucrée, selon que l'on emploie ou non l'action de l'électricité.

L'électricité, suivant son énergie, peut vaincre la force d'agrégation, et détruire la constitution organique. MM. Prévost et Dumas ont observé qu'en faisant passer une étincelle électrique au travers d'une petite goutte de sang, celle-ci prenait un aspect framboisé, annonçant la séparation partielle d'une partie des globules élémentaires qui la composaient; nous renvoyons du reste le lecteur,

page 47, aux expériences de Davy, relatives à l'action voltaïque sur les chairs musculaires.

Brandt a observé que l'albumine, ou blanc d'œuf, se coagule au pôle positif. MM. Prévost et Dumas ont reconnu, en outre, qu'il se formait au pôle négatif une substance analogue à la gelée parfaitement transparente, et possédant les propriétés du mucus; ces deux produits sont, l'un de l'albumine combinée avec un acide, l'autre de l'albumine combinée avec un alcali.

M. Dutrochet, en reprenant cette question à l'aide du microscope, a observé des faits intéressants qui montrent que ces deux combinaisons, en se rencontrant vers le milieu de l'intervalle qui sépare les deux électrodes, donnent lieu à un précipité d'albumine, qui lui avait semblé d'abord avoir une organisation, mais qui, en réalité, n'était qu'un magma.

Emploi de l'électricité comme moyen d'analyse chimique. M. Becquerel (38) a montré que, lorsqu'on décomposait électro-chimiquement des dissolutions contenant du plomb ou du manganèse, ces deux métaux se suroxydaient au pôle positif, de sorte qu'il était possible de séparer facilement le manganèse du fer et le plomb de l'argent ou du cuivre avec lesquels ces métaux étaient combinés; l'énergie du courant doit être en rapport avec la quantité de manganèse ou de plomb contenue dans la dissolution: ce procédé est tellement délicat, qu'on accuse la présence de un milligramme d'acétate ou de sulfate de manganèse dissous dans un gramme d'eau.

M. Becquerel (39) a donné un moyen de séparer l'or d'une dissolution qui contient du cuivre, du fer ou du plomb; l'art consiste, en employant l'appareil simple, de prendre pour électrode positive le métal que l'on veut laisser dans la dissolution; c'est ainsi que, dans le traitement électro-chimique, comme on le verra, lorsque l'on veut séparer l'argent du plomb, on se sert d'une électrode positive de plomb.

On peut faire usage encore, dans un grand nombre de cas, de la loi des masses, qui permet de retirer d'une dissolution une substance à l'exclusion des autres; il suffit pour cela de proportionner les rapports des quantités de substances dissoutes.

§ IV. *Actions électro-chimiques lentes.*

Réduction des métaux et formation de divers produits cristallisés. Les effets résultant des actions lentes peuvent former deux

séries : la première comprend ceux que l'on obtient directement avec l'électricité ; la seconde, les effets produits naturellement dans les diverses formations terrestres avec le concours des forces électriques, bien avéré ou probable. Passons en revue rapidement ces deux séries d'effets :

On avait remarqué que les objets en argent qui séjournaient longtemps dans une fosse d'aisances étaient transformés, par un effet de cémentation, en sulfure d'argent cristallisé, sans changer de forme ; que les médailles de plomb recouvertes d'une feuille d'or très-mince s'altéraient beaucoup plus rapidement que celles qui n'étaient pas recouvertes ; que le fer était d'autant plus altéré sous les influences atmosphériques, que sa surface était couverte çà et là d'oxyde : tous ces effets avaient effectivement une origine électrique due à des actions de contact.

Bucholz (40) a observé le premier que les métaux, leurs dissolutions et l'eau constituaient des couples voltaïques dont l'action était suffisante pour décomposer la dissolution avec réduction des bases. Dans chacun de ces couples il y a deux courants cheminant dans le même sens : courant dû à l'action de l'eau sur le métal ; courant provenant de la réaction des deux liquides l'un sur l'autre. Or ces effets n'ont lieu qu'avec les sels de cuivre, d'argent, etc., et nullement avec le zinc, le fer et l'étain, attendu que leurs dissolutions attaquent plus ces métaux que ne le fait l'eau ; dans ce cas, il y a courant en sens inverse ; il en résulte que le principe n'est pas aussi général que l'avait avancé Bucholz.

D'un autre côté, Davy (41), dans le cours de ses recherches électro-chimiques, essaya de préserver le doublage en cuivre des vaisseaux de l'action corrosive de l'eau de mer, en fixant çà et là sur la surface du doublage de petites plaques de zinc ou de fonte plus oxydable que le cuivre, et rendant ainsi celui-ci négatif ; mais on ne tarda pas à reconnaître que les feuilles de cuivre, tout en étant préservées, se recouvraient, en raison de leur état négatif, de carbonate de chaux et de magnésie, de coquilles et de plantes dont le poids retardait la marche du navire ; on fut obligé de renoncer à ce mode de préservation.

On a cherché depuis à atteindre ce but en substituant au cuivre le bronze, composé de 94 parties de cuivre et de 6 d'étain ; les molécules de cet alliage pouvant être considérées comme autant de couples voltaïques, l'eau de mer devait tendre sans cesse à enlever l'étain qui joue le rôle d'élément électro-positif. Des expériences faites

en France et en Angleterre (42) parurent d'abord favorables à l'emploi du doublage en bronze fondu et fixé avec des clous de même alliage ; mais de nouvelles expériences firent donner la préférence au doublage en cuivre. Le doublage en zinc n'a été adopté dans la marine marchande que pour des cas spéciaux.

La question des actions électro-chimiques lentes en était là lorsque M. Becquerel, ayant analysé les effets électriques produits dans les actions chimiques, eut l'idée de faire servir ces mêmes effets à la production d'actions chimiques analogues à celles qui ont lieu dans les parties de la couche terrestre où l'eau et l'air pénètrent, et où il existe des substances sur lesquelles ils réagissent ; il a employé à cet effet des appareils simples ou composés, fonctionnant pendant des mois, des années, et constituant des couples ou des piles à courant constant.

M. Becquerel (43) a montré d'abord, en 1827, qu'avec un couple thermo-électrique formé de deux fils de cuivre réunis par un de leurs bouts, au moyen de deux crochets passés l'un dans l'autre, et plongeant les deux bouts libres dans une dissolution de sulfate ou de nitrate de cuivre, on décomposait la dissolution en chauffant à droite ou à gauche des points de jonction, au moyen d'une lampe à alcool ; la même année (44), il fit connaître un appareil simple avec lequel on obtenait cristallisés les doubles chlorures, doubles iodures, doubles sulfures métalliques et alcalins, puis les chlorures, les iodures et les sulfures simples métalliques, en décomposant électro-chimiquement les premiers; il décrivit en même temps une autre disposition pour obtenir directement les chlorures de cuivre et d'argent, ainsi que le protoxyde de cuivre cristallisé. L'appareil simple (45) pour obtenir cristallisés plusieurs oxydes métalliques, tels que les protoxydes de cuivre et de plomb, etc., se compose d'un couple formé d'une dissolution concentrée d'un sel à base de cuivre ou de plomb et d'un autre qui ne l'est pas, et d'une lame de l'un de ces deux métaux ; la dissolution saturée est positive relativement à celle qui ne l'est pas, et attaque moins le métal que l'autre ; le tout est disposé de manière à ce que les actions électro-chimiques soient très-lentes. L'oxyde de zinc (46) cristallisé dans le système régulier s'obtient en faisant réagir lentement un couple zinc et platine sur une dissolution de zincate de potasse, etc.

M. Becquerel (47) a décrit un autre appareil, à l'aide duquel il obtient cristallisées diverses substances, et notamment le soufre.

Le peroxyde d'argent cristallisé s'obtient facilement, comme

Ritter l'a reconnu, au pôle positif d'une dissolution d'argent soumise à l'action voltaïque. Les peroxydes anhydres de plomb et de manganèse se forment également au pôle positif.

Le peroxyde hydraté jaune de plomb a été obtenu par M. Becquerel (49), en soumettant à l'action d'un courant provenant de quelques couples à courant constant, au moyen de deux lames de platine plongeant l'une dans une dissolution d'oxyde de plomb dans la potasse et l'autre dans de l'acide nitrique, les deux liquides étant séparés l'un de l'autre avec un diaphragme, et la dissolution mise en rapport avec l'électrode positive. Peu à peu, la lame de platine qui se trouve dans cette dernière se recouvre d'un dépôt jaune de peroxyde hydrate de plomb. Il a fait usage également (49) des appareils simples fonctionnant longtemps pour opérer la réduction de la silice, de la glucine, de l'alumine, de la magnésie, etc., et obtenir cristallisés les corps simples dont elles dérivent, tels que le silicium, le glucium, l'aluminium, le magnésium, etc.

M. Golding-Bird (50), en 1837, a obtenu les mêmes réductions en moins de temps, avec les mêmes appareils, et employant en outre un couple à courant constant. Il a obtenu également par ce moyen l'amalgame de potassium.

M. Becquerel a reproduit électro-chimiquement l'altération qu'éprouve un objet en argent qui a séjourné longtemps dans une fosse d'aisance, lequel est transformé en totalité en sulfure d'argent cristallisé. Ses recherches à cet égard l'ont mis sur la voie pour décomposer la galène (sulfure de plomb) par les actions combinées de l'eau salée et du sulfate de cuivre. Le résultat a été 1° du chlorure de plomb en aiguilles; 2° du sulfate de plomb en octaèdres cunéiformes comme les cristaux naturels; 3° du sulfure noir de cuivre non cristallisé.

Il a produit également les phosphates de chaux et de fer (51). Il a obtenu le phosphate de chaux, le carbonate de chaux, l'arragonite cristallisée et le plomb carbonaté cristallisé, en faisant réagir pendant plusieurs années une solution de double carbonate de soude et de cuivre sur un couple plomb et platine; le cuivre carbonaté bibasique, ou malachite, en cristaux aciculaires à l'aide des doubles décompositions et décompositions successives, en opérant d'abord électro-chimiquement, puis en ne faisant intervenir que les affinités. Ce procédé chimique consiste à faire réagir lentement une dissolution d'azotate de cuivre sur du calcaire poreux, qui se recouvre de cristaux aciculaires de sous-azotate de cuivre que

l'on change en double carbonate de cuivre et de soude, puis en carbonate bibasique de cuivre, au moyen d'immersions prolongées d'abord dans une dissolution de bi-carbonate de soude, puis dans une dissolution de sulfate de cuivre.

Le cuivre sous-sulfaté (brochantite) a été obtenu en faisant réagir lentement une dissolution de sulfate de cuivre sur du calcaire poreux; le spath calcaire (chaux carbonatée) rhomboïdal et l'arragonite, dans la réaction à des températures différentes d'une dissolution de bicarbonate de soude sur du gypse. Les phosphates et arséniates métalliques ont été produits par des moyens analogues. M. Becquerel a montré que dans la terre de semblables réactions pouvaient avoir lieu.

M. Cross (52) en 1837 a produit un certain nombre de composés cristallisés, en faisant usage de piles formées d'un grand nombre d'éléments fonctionnant avec de l'eau seulement pendant un temps plus ou moins long. Nous citerons particulièrement la silice ou quartz prismé, la pyrite de fer, plusieurs sulfures, le sulfate de baryte, etc.

M. Becquerel avait opéré pendant longtemps à la température et à la pression ordinaires de l'atmosphère ; dans un travail récent (53) il a fait connaître le résultat de nouvelles expériences faites à des températures et à des pressions plus ou moins élevées, dans le but d'avoir une idée de ce qui avait dû se passer dans les terrains de sédiment lorsqu'ils furent recouverts par les roches d'épanchement, telles que le granite, les porphyres, les basaltes, etc. Les expériences ont été faites dans des tubes de verre vert très-résistant, fermés à la lampe, et dans lesquels on avait introduit les substances solides et liquides destinées à réagir les unes sur les autres, ainsi que du sulfure de carbone, pour avoir une pression de 3 à 4 atmosphères, en maintenant les tubes à une température de 100°.

Avec le gypse et le bicarbonate de soude, il a obtenu en quelques jours des cristaux nets et limpides d'arragonite ; c'est ce qui explique la présence de cette substance dans les basaltes et les terrains de trapp ; des cristaux de protoxyde de cuivre il a produit encore différents sulfures métalliques et les carbonates de cuivre vert et bleu cristallisés, ainsi que d'autres composés. Il a reconnu ainsi que les actions combinées de la chaleur et de la pression donnent une activité nouvelle aux effets des actions lentes résultant du contact des solides et des liquides, ce qui permet d'expliquer certains phénomènes géologiques qui n'avaient pu l'être jusqu'ici.

Action de l'électricité à faible tension sur les substances inso-

lubles. Le procédé d'expérimentation employé pour faire réagir l'électricité à faible tension sur des substances insolubles est très-simple (54) : il suffit de mettre au fond d'un tube ces substances en parties très-divisées avec une dissolution convenablement choisie et une lame de métal oxydable, puis de fermer le tube à la lampe. Avec une dissolution saturée de sel marin, du carbonate de cuivre nouvellement préparé et une lame de fer, peu à peu le carbonate, de bleu qu'il était, devient noir, c'est-à-dire anhydre, la lame de fer se recouvre de cuivre à l'état métallique, et la décomposition est complète au bout d'un certain temps. En substituant au fer le plomb, il y a décomposition du carbonate, formation de double chlorure de plomb et de sodium en cristaux rhomboédrique, de carbonate de plomb, et probablement de chloro-carbonate. Avec le carbonate d'argent, le plomb et l'eau distillée, on a de l'argent métallique et du carbonate hydraté de plomb. Les arséniates et phosphates métalliques sont également décomposés, avec formation de différents produits; on conçoit combien ce mode d'expérimentation est fécond en applications.

Actions lentes dans le sein de la terre. Toutes les fois que deux substances conductrices de l'électricité en contact sont mouillées par un liquide qui attaque l'une d'elles, il en résulte des effets électriques donnant lieu à des actions chimiques. Des brins d'herbes ou des radicelles de plantes décomposés jusqu'à la carbonisation, de l'oxyde de fer, peuvent servir d'électrodes négatives. On conçoit, dès lors, qu'à la surface et dans l'intérieur de la terre, surtout dans les roches ou les filons crevassés, il doit exister des couples voltaïques sans nombre produisant des réactions chimiques lentes.

Quant à la conductibilité propre de la terre, que les recherches sur la télégraphie électrique ont mise en évidence comme on le verra dans le chapitre XII, elle est due à l'eau, qui se trouve en plus ou moins grande proportion dans les diverses formations terrestres. Ces formations, ayant souvent une grande étendue, peuvent servir à transmettre l'électricité à des distances considérables.

Les causes qui produisent des courants terrestres sont innombrables, comme on l'a déjà dit. Prenons pour exemple les argiles qui occupent souvent une vaste étendue de pays, et qui sont plus ou moins humides, en raison de leur perméabilité. Supposons qu'une portion de ces argiles soit humectée d'eau chargée de sulfate de chaux, et l'autre d'eau seulement. Pendant le mélange des deux liquides, il y aura dégagement d'électricité; l'eau séléniteuse pren-

dra l'électricité positive, et l'eau ordinaire l'électricité négative : ces deux électricités se recombinent par l'intermédiaire de tous les corps conducteurs qui se trouvent près de la surface de contact, et notamment des racines et radicelles carbonisées. D'autres terrains humectés de liquides différents, comme les terrains salés et ceux qui ne le sont pas, donnent lieu à des effets semblables ; à l'aide du galvanomètre et de deux lames de platine, on met en évidence ces effets (55). Si l'on substitue par la pensée aux lames de platine des corpuscules conducteurs, il en résultera des courants électriques qui agiront comme forces chimiques, et produiront une foule de réactions donnant lieu à des composés de nature diverse.

Les pyrites se changent en proto-sulfate de fer, au contact de l'eau et de l'air, d'autant plus promptement qu'elles sont en contact avec une substance conductrice ; les pyrites aurifères (persulfure) éprouvent un autre mode de décomposition, auquel la présence de l'or contribue sans doute ; elles perdent, par un effet de cémentation, leur soufre, qui est remplacé par une quantité proportionnelle d'eau ; le phosphate de fer peut se former dans les tourbières en vertu d'une action électro-chimique, comme M. Becquerel l'a démontré (56).

Les principes généraux qui ont été exposés dans ce chapitre montrent comment l'électricité intervient dans la nature comme force chimique, en même temps qu'ils font connaître toute la fécondité de ce principe. C'est une nouvelle voie ouverte pour étudier les altérations qui ont lieu dans le corps du globe.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE IX.

(1) Singer, *Éléments d'électr. et de galvan.*, traduct. franç., p. 220.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. IV, p. 188.

(2') Regnault, *Traité de chimie*, t. I, p. 105.

(3) *Ann. de chim.*, t. XXVII, p. 161 (1798).

(4) *Idem*, t. XL, p. 169 (1801).

(5) *Philos. trans.*, 1823. — Faraday, *Exper. resear.*, t. I, p. 127.

(6) *Biblioth. britans.*, 1799, t. XII.

(7) *Arch. d'électr. Genève*, t. I, p. 297.

(8) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XXXVII, p. 376.

(9) *Idem, id.* t. XXXV, p. 62.

(10) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*. t. XXXVI, p. 430.

(11) *Philos. trans.*, 1833 et 1834. — Faraday, *Exper. researches*, t. I, p. 206.

(12) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. LVIII, p. 78. *Idem.*, t. LXXI, p. 109, et t. XLXIV, p. 103. — *Biblioth. de Genève*, t. XXI, p. 153.

(13) *Philosoph. trans.*, 1839. — *Arch. d'élect. de Genève*, t. I, p. 594.

(14) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. II, p. 162 et 257.

(14') Pogg., *Ann.*, t. CII, p. 1.—*Arch. des sc. phys., Genève*, t. XXXVI, p. 350.

(15) *Arch. d'élect.*, t. I, p. 281.

(16) Becquerel, *Traité d'électr.*, t. VI, p. 365.

(16') *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLI, p. 115. — *Comptes rendus de l'Ac. des sciences*, t. XXXVI, 390, 443 et 445.

(17) *Philos. trans.*, 1844.

(18) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XX, p. 1544.

(19) *Annalen der physik*, t. LXXXIX, 1853.

(20) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXI, p. 257.

(21) *Idem*, 2e série, t. XLXVI, p. 225.

(22) *Biblioth. univ. de Genève*, t. XXV et XXVI, 1854.

(23) *Comptes rendus*, t. XXXVIII. p. 897.

(24) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLV, p. 432.

(25) *Comptes rendus*, t. XXII.

(26) *Philos. trans.*, 1833, p. 33, et 1834, p. 77.

(27) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXVII.

(28) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. IV, p. 785.

(29) *Idem*, t. XXII, p. 1846.

(29') W. Weber, *Elektro-dynamique maasbestimmung.*—*Ann. de chim. et de phis.*, 3e série, t. XLIX, p. 115.

(30) *Idem*, t. XXXIII, p. 185, et t. XXXVIII, p. 897.

(31) *Annalen der chemie and pharmac.*, t. LXXXII, p. 137. — *Annales de chimie et de physique*, t. XXXVI, p. 17.

(32) *Ann. de chim. et de phys.*, t. XLIII, p. 27.

(33) *Philos. trans.*, t. XIII et XIV. — London and Edimburg, dec. 1840.

(34) Becquerel, *Traité d'électricité*, t. I, p. 512.

(35) *Archives de botanique*, 1er volume.

(36) *Ann. de chim.*, t. LXXVI, p. 257.

(37) *Idem*, t. XXVIII, p. 118, et t. XXX, p. 42.

(38) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. LXIII, p. 380.

(39) *Comptes rendus*, t. XIV, p. 121.

(40) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXVI, p. 331.

(41) *Idem*, 1re série, t. XXXVI et XXXIX.

(42) Becquerel, *Traité d'électricité et de magnétisme*, t. V, 1re partie, p. 59.

(43) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXIV, p. 158.

(44) *Idem*, t. XXXV, p. 113.

(45) *Idem*, t. XLI, p. 5, et t. XLII, p. 45.

(46) *Idem*, t. XLIII, p. 131, et t. XLI, p. 101 — *Comptes rendus de l'Acad. des scienc. de l'Inst.*, t. XXXIV, p. 30.

(47) Becquerel et E. Becquerel, *Traité d'électricité*, t. II, p. 132.

(48) *Idem*, *id.*, t. II, p. 130.

(49) *Annales de chimie et de physique*, t. XLVIII, p. 337.

(50) *Proc. of the royal Society*, fev. 1837. — *Bibl. univ.*, t. XII, p. 416.

(51) *Comptes rendus*, t. XXXIV, p. 31, 575, 577.

(52) Becquerel, *Traité d'élect.*, t. V, 1re partie, p. 289.

(53) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. XLIV, p. 938.

(54) *Idem*, t. IV, p. 824.

(55) *Comptes rendus de l'Académie*, t. III, p. 1101.

(56) Becquerel, *Traité d'électricité*, 1re partie, t. V, p. 94.

CHAPITRE X.

Effets mécaniques et physiques dus à l'électricité, principalement depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle.

---

§ I. *Effets mécaniques. — Transport.*

Effets mécaniques des décharges. On a vu dans le chapitre I[er] que, dans le siècle dernier, les effets de l'électricité statique, qui étaient les seuls que l'on eût étudiés, avaient conduit à des observations curieuses; c'est ainsi que Beccaria et que Priestley (1) avaient vu les effets d'expansion que l'électricité peut produire; que Kinnerstley, en 1761 (2), avait montré le refoulement de l'air par le passage d'une étincelle électrique, et que les expériences faites plus tard vers la fin du siècle dernier par Van Marum (p. 15), à l'aide d'une machine plus puissante que celles qui avaient été en usage jusque-là, avaient mis en évidence les effets mécaniques que l'on pouvait obtenir dans les expériences de physique, lesquels reproduisaient sur une petite échelle ceux que l'on constate lors de la chute de la foudre.

L'inégalité des bavures observée par Gough (3) dans l'expérience du perce-carte, et répétée par Symmer (4) en plaçant une lame d'étain au milieu d'un cahier de papier, indiquait une inégalité d'action suivant le sens de la décharge. On a vu que l'expérience de Trémery (5), page 52, en plaçant la carte dans le vide, indiquait que l'ouverture se rapprochait du milieu de l'intervalle entre les deux pointes, tandis qu'elle avait lieu en face de la pointe négative dans l'air. Cette expérience montrait que dans l'air il y avait une tendance de la part de l'électricité positive à franchir plus facilement les milieux interposés entre les conducteurs; nous allons retrouver des effets du même genre avec les courants électriques.

Priestley avait déjà observé en 1766 qu'une chaîne parcourue par une décharge était raccourcie ; Nairne reconnut en 1780 (page 15) que des fils métalliques traversés par des décharges avaient diminué de longueur. M. E. Becquerel (6) a étudié ce fait et a montré non-seulement que le fil augmentait le diamètre, mais que par l'effet de décharges successives il devient ondulé, et qu'à mesure que les décharges se succèdent, les parties ondulées augmentent de grandeur sans jamais disparaître pour faire place à d'autres.

La répulsion mutuelle des corps électrisés de même nature a donné lieu à la construction d'un petit appareil nommé *tourniquet électrique*, dans lequel une aiguille isolée qui est mobile sur un pivot, et dont les parties extérieures sont recourbées, se meut au moment de l'électrisation : c'est Hamilton (7) qui le construisit le premier ; on crut que l'effet provenait d'un effet de recul dû à l'écoulement de l'électricité ; mais il doit être attribué à la répulsion mutuelle de l'air électrisé en face des pointes et de ces ponites elles-mêmes. Les expériences faites par Wilson et Priestley (8), qui montrent que ces appareils ne tournent pas dans le vide ni dans un récipient fermé ; celles de Cavallo et celles plus récentes de M. Masson (9), indiquant que dans les liquides isolants la rotation a lieu, tandis que dans l'eau elle ne se produit pas, viennent à l'appui de cette explication.

On a vu, page 15, que Beccaria avait avancé que les décharges électriques transportaient des substances se trouvant sur leur route ; Muschenbroek (10) avait la même opinion ; Priestley, en cherchant à vérifier ce fait, observa (11) en 1766 les taches circulaires faites sur des lames métalliques par de fortes explosions, et les produisit dans le vide et dans l'air condensé. Ces expériences ont servi de point de départ aux recherches de Fusinieri (12). Ce physicien a reconnu que l'étincelle qui traverse l'air en sortant d'un conducteur en laiton, emporte avec elle du laiton à l'état de fusion et des particules incandescentes de zinc ; il en est de même des conducteurs formés d'autres métaux. Dans ces transports il y a réciprocité d'action, et, en faisant éclater la décharge entre deux boules, il y a transport de petites parcelles fondues de l'une à l'autre. En interposant des plaques métalliques entre les conducteurs, Fusinieri observa des effets du même genre, et il en a conclu que le transport des métaux a lieu au travers des métaux, et que l'étincelle électrique est toujours accompagnée de matière à l'état de fusion ou d'incandescence.

Les effets observés antérieurement par Davy (voir pages 51 et 52), et produits entre les pôles de la pile avec des métaux ou du charbon, avaient prouvé que les matières pondérables très-divisées, en incandescence ou en combustion, étaient emportées par le courant et constituaient l'arc voltaïque. Nous verrons plus loin que l'aspect des étincelles ou la composition de la lumière de l'arc voltaïque suffit souvent pour indiquer la présence de molécules incandescentes, puisqu'elles affectent les couleurs des métaux en combustion. Fusinieri a, en outre, émis l'opinion que les effets mécaniques de perforation, de rupture et de déchirements pourraient être dus à la matière elle-même, animée de la même vitesse que celle de l'électricité, laquelle est excessive.

Ces effets se lient à ceux dont nous allons parler, et qui concernent les figures électriques dues à des effets d'électricité par influence, à des phénomènes de transport, ou à des modifications de la surface des corps par l'influence de l'électricité. On a vu, page 147, que Lichtemberg avait le premier montré que des poussières se fixaient inégalement sur des surfaces en partie électrisées. Les vapeurs possèdent la même faculté, sans qu'elles soient électrisées préalablement; cette propriété conduit à des figures différentes de celles que nous venons de rappeler.

M. Riess (13) a observé des effets du même genre qui se manifestent dans différentes circonstances, et il a fait une étude complète des images ou des apparences que l'on peut obtenir : Supposons, pour en indiquer quelques-unes, que l'on place une plaque de verre entre deux pointes dans l'arc de clôture d'une batterie, et que par la décharge une étincelle se meuve sur chaque surface jusqu'au bord, on y reconnaît de faibles traces de désagrégation. Ces traces, étudiées à l'électromètre, sont conductrices; et ce qu'il y a de particulier, c'est qu'on y trouve d'autres parties de la surface qui sont devenues conductrices sans avoir subi de modifications apparentes. On les rend sensibles en projetant de la vapeur avec la bouche; elles sont plus belles sur le mica ; au lieu d'une décharge complète de la batterie, il suffit, pour les produire, d'employer les aigrettes bleuâtres qui jaillissent des pointes. On a donné à ces figures le nom de *figures roriques*.

En recevant l'étincelle sur des lames de plaqué d'or ou d'argent, elle y laisse une faible tache qui, après l'exposition à la vapeur humide, se présente sous l'aspect d'un cercle large de plusieurs lignes, parfaitement net et entouré d'autres cercles plus ou moins chargés de vapeur.

M. Karsten (14) a montré qu'il se produit des figures du même genre en plaçant une médaille, un corps conducteur, sur une surface plane en cire à cacheter, en verre, etc. : on électrise cette médaille, et ensuite en insufflant de la vapeur d'eau avec l'haleine sur la surface, ou bien en exposant celle-ci aux émanations d'autres vapeurs, on a des empreintes de la médaille. MM. Knorr (15), Masson (16), etc., ont varié ces différents effets.

M. Moser (17) a obtenu des condensations de vapeur et l'apparition d'images par le voisinage de corps en présence et sans l'emploi de l'électricité, mais qui néanmoins sont dues probablement à des phénomènes de transport.

Les effets mécaniques des décharges électriques, d'après lesquels les objets sont brisés, les verres percés, etc., ont été utilisés dernièrement : en se servant des décharges dues aux courants induits, et obtenues à l'aide de l'appareil d'induction décrit page 94, on peut facilement percer des pierres, des verres même de deux centimètres d'épaisseur. Les feuilles de papier sont percées par l'étincelle électrique et la marche d'une pointe, qui est en relation avec l'appareil d'induction, peut être indiquée sur une feuille de papier placée à distance ; ce sont des applications curieuses des effets mécaniques des décharges dues aux courants induits.

Effets mécaniques des courants. Le phénomène observé par Porret en 1816 (page 53), et d'après lequel il y a transport mécanique de l'eau au travers d'une membrane perméable qui sépare deux parties d'un vase contenant le liquide, en mettant chacune en relation avec l'un des pôles d'une forte pile, montre également que les courants électriques, comme les décharges, sont accompagnés d'effets mécaniques. Ce transport a lieu, comme celui des particules de charbon dans l'expérience de l'arc voltaïque, de la partie électrisée positivement à la partie électrisée négativement.

M. Becquerel (18) a observé des faits de même nature, mais en disposant des appareils pour que le passage du courant pût déplacer des poussières terreuses mélangées au liquide.

M. Wiedeman (19) a étudié le phénomène en prenant différentes cloisons perméables et en faisant varier l'intensité du courant de la pile, ainsi que l'étendue de la cloison. Il a démontré que l'action est en raison directe de l'intensité du courant, et à égalité d'intensité du courant, en raison inverse de la surface libre de la cloison.

§ II. *Changements d'élasticité. Ozone.*

Le passage de l'électricité, soit par décharges, soit par voie de conductibilité dans les corps, est suivi d'un grand nombre d'effets physiques remarquables, sur la plupart desquels on a déjà parlé dans les premiers chapitres, mais qui ont été le sujet d'études suivies depuis quarante ans. Si l'on fait abstraction des effets électro-magnétiques qui ont été traités spécialement, les effets dont il est question sont des changements moléculaires, des phénomènes calorifiques et lumineux.

Changement d'élasticité des métaux. Lorsque l'électricité circule dans les métaux, l'arrangement moléculaire peut se trouver modifié. Sans nous arrêter au fait signalé par Peltier, et d'après lequel les fils métalliques deviennent cassants, fait qui demanderait à être vérifié, nous dirons que M. Wertheim (20) a montré que le courant électrique produit une diminution momentanée du coefficient d'élasticité dans les fils métalliques qu'il parcourt, et cela a lieu par son action propre et indépendamment de la diminution qui provient de l'élévation de température. Il a montré aussi que la cohésion des fils est diminuée par le courant; toutefois la variabilité de cette propriété ne permet pas de distinguer si cette diminution est due à une action propre du courant, ou bien si elle est seulement une conséquence de l'élévation de température.

Ozone. On sait que la chaleur a la propriété de modifier certains corps simples, tels que le soufre, le phosphore, le carbone, et que plusieurs oxydes métalliques, sans perdre de leur poids, éprouvent sous son influence de véritables transformations isomériques. L'électricité peut-elle donner lieu à des effets analogues? Les différents résultats que présente l'oxygène soumis à l'action de décharges électriques, ou bien produit sous l'influence des courants électriques, semblent devoir être expliqués, du moins jusqu'ici, par une action analogue. Nous devons dire que c'est le seul corps qui ait présenté jusqu'à présent des résultats de ce genre.

Van Marum (21), ayant à sa disposition la grande machine électrique du musée de Teyler, reprit les expériences faites par divers physiciens, qui avaient reconnu, même avant Priestley, que les gaz éprouvaient des changements considérables par suite du passage des étincelles électriques. Il vit que dans l'oxygène une succession d'étincelles électriques développe une odeur caractéristique, et qu'une

fois ce gaz soumis à cette électrisation préalable, il acquiert la faculté de se combiner rapidement au mercure, effet qui n'a lieu que très-lentement à la température ordinaire.

Ces résultats importants furent, en quelque sorte, oubliés pendant longtemps. Vers l'année 1840, M. Schœnbein (22) eut l'occasion de remarquer l'odeur qui accompagne la production du gaz oxygène lors de la décomposition de l'eau par la pile, odeur qui rappelait celle du phosphore et du soufre en combustion, et la compara à celle qui se manifeste dans les décharges électriques ou lorsque la foudre éclate. Il étudia alors avec soin les propriétés du gaz oxygène émanant du pôle positif dans un appareil à décomposer l'eau, et reconnut que ce gaz possède une faculté oxydante très-énergique que n'a pas l'oxygène dans les conditions ordinaires. D'après ses premières recherches, M. Schœnbein ne pensa pas devoir se prononcer sur la nature du composé odorant qui se produit dans ces circonstances diverses, et savoir si c'était une combinaison ou un état particulier de l'oxygène; néanmoins il lui donna le nom d'*ozone*.

Le même physicien a fait connaître une méthode chimique permettant d'obtenir une quantité plus considérable d'ozone que par tout autre procédé : elle consiste à faire agir de l'oxygène humide ou de l'air humide sur du phosphore à la température de 20 ou 25 degrés.

Depuis, ce sujet a été étudié attentivement par plusieurs physiciens et chimistes, parmi lesquels nous citerons MM. Williamson, Ozann, Marignac et Delarive (23); ces deux derniers savants arrivèrent à cette conclusion, que les effets de l'ozone sont dus à l'oxygène qui se trouve alors dans un état particulier d'activité chimique. M. Schœnbein continua, de son côté, à étudier de nouveau la question.

MM. Frémy et E. Becquerel (24), en 1852, firent conjointement différentes recherches pour étudier les propriétés diverses de cette matière. Ils ont reconnu que l'ozone se forme dans toutes les circonstances où l'oxygène est soumis à l'influence de l'électricité; que l'oxygène préparé par les méthodes les plus diverses acquiert toujours des propriétés oxydantes très-marquées sous l'influence de l'électricité; d'un autre côté, ils ont pu rendre un volume donné d'oxygène entièrement absorbable à froid par le mercure, l'argent ou l'iodure de potassium. D'après cela, ils ont pensé que c'était bien l'oxygène seul qui était modifié et qui donnait lieu à ces effets si remarquables. Ils ont proposé d'appeler le corps, oxygène électrisé, et ont émis l'opinion que ce corps était doué de l'activité que l'on re-

connaît aux substances dites à l'état naissant. L'oxygène différait, dans ce cas, des autres corps en ce qu'il aurait la propriété de conserver cet état, que les autres matières perdent dans les préparations chimiques à l'aide desquelles on les isole.

MM. Frémy et E. Becquerel ont également observé que l'étincelle électrique qui se manifeste lors de la rupture des circuits voltaïques forme un véritable arc voltaïque contenant des molécules de platine très-divisé. Cet arc ne communique pas à l'oxygène un pouvoir oxydant particulier, car l'élévation de température qui se manifeste s'y oppose ; mais, en agissant à la fois comme mousse de platine et comme électricité, il peut déterminer rapidement des combinaisons de gaz entre eux : telle est la combinaison de l'azote à l'oxygène pour former des vapeurs nitreuses beaucoup plus rapidement que dans l'expérience de Cavendish ; celle de l'azote à l'hydrogène pour produire de l'ammoniaque ; celle de l'acide sulfureux à l'oxygène pour engendrer l'acide sulfurique, etc.

Depuis cette époque, ce sujet a de nouveau attiré l'attention des savants, parmi lesquels nous citerons MM. Soret et Houzeau (25). Ce dernier a même indiqué un autre mode de préparation chimique de l'ozone que celui qui avait été indiqué par M. Schœnbein ; il consiste à décomposer le bioxyde de barium par l'acide sulfurique à un équivalent d'eau ; l'oxygène dégagé est alors odorant et possède les propriétés oxydantes de l'ozone.

Le principal motif pour lequel la plupart des chimistes ont douté de l'existence de l'ozone comme modification chimique de l'oxygène, et qui a fait restreindre son étude, c'est que dans un volume donné d'oxygène il ne se trouve jamais qu'une partie très-petite qui soit modifiée, et que l'on ne peut dépasser une certaine limite, à moins que la partie active, ou l'ozone, ne soit absorbée au fur et à mesure de sa production.

On peut rapprocher les propriétés remarquables qu'acquiert l'oxygène par l'action des étincelles électriques ou lorsqu'elle est à l'état d'ozone, de la faculté que possède ce gaz de devenir magnétique sous l'action des aimants (voir page 107). Ces effets magnétiques, qui sont exagérés dans l'oxygène, quand on les compare à ceux qui sont produits par les autres gaz, semblent indiquer que l'oxygène peut être modifié par l'électricité plus facilement que les autres fluides aériformes.

§ III. *Effets calorifiques de l'électricité.*

Décharges électriques. Les effets calorifiques produits par l'électricité sont très-variés, et on les observe toutes les fois que l'électricité est transmise au travers des corps sous forme de décharges ou de courants.

On a vu, dans le chapitre premier, page 13, quelles avaient été les recherches des physiciens du siècle dernier touchant les actions calorifiques produites dans les gaz, dans les matières combustibles et dans les métaux. Les recherches de Canton, de Priestley, de Van-Marum, ont été citées page 15. Depuis, l'action des décharges sur les métaux a été étudiée par M. Harris (26). Pour reconnaître l'élévation de température provenant des décharges électriques traversant des fils métalliques, on introduit ces fils dans l'intérieur d'un thermomètre à air, et, après la décharge qui échauffe le fil, et par conséquent l'air intérieur, on conclut, d'après la quantité de chaleur, la dilatation de l'air. M. Harris a pu déterminer ainsi les lois du dégagement de chaleur dans les différentes conditions des expériences.

M. Riess (27), qui a fait de nombreuses recherches sur ce sujet, a étudié d'une manière complète l'influence de la charge électrique, celle des dimensions des fils métalliques, de leur nature, l'influence des conducteurs qui sont parcourus par l'électricité, et enfin celle des conducteurs placés dans le voisinage, lesquels retardent la décharge, et par suite modifient l'échauffement.

Courants électriques. Les courants électriques sont capables de puissants effets calorifiques, comme l'ont prouvé les expériences de Davy, voir page 51, et celles d'après lesquelles on a fondu des fils métalliques de diverse nature. Mais cet effet ne se produit pas seulement quand le courant électrique a une certaine intensité, il se manifeste encore dans un circuit quelconque, quelque faible que soit le courant, pourvu qu'il y ait circulation d'électricité ; on peut même poser en principe général que toutes les fois que l'électricité chemine dans un corps, il se manifeste une élévation de température.

Les effets calorifiques produits par le passage de l'électricité sont uniformes dans un conducteur homogène et de même dimension dans toutes ses parties ; les expériences faites par Peltier, à l'aide de la pince thermo-électrique dont il a été question page 160, prouvent en effet que, quelque faible que soit le courant qui circule dans un

fil, il y a élévation de température et que la chaleur est la même dans toute la longueur du fil, à l'exception des extrémités où elle augmente ou diminue, comme on le verra plus loin. On peut également manifester l'effet calorifique produit par un courant électrique faible en faisant passer ce courant dans l'hélice d'un thermomètre métallique de Bréguet, ainsi que l'a fait M. Delarive.

M. Joule (28) a déterminé les lois du dégagement de la chaleur par suite du passage des courants électriques dans des fils conducteurs suivant l'intensité du courant; il a posé en principe que dans les fils métalliques on observe les effets suivants :

1° La quantité de chaleur dégagée par le passage d'un courant électrique dans un fil métallique est en raison directe du carré de la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné ;

2° Elle est en raison directe de la résistance à la conductibilité de ce fil, ou bien, si l'on veut, en raison inverse du pouvoir conducteur.

M. E. Becquerel (29), à l'aide d'une méthode précise, a déterminé également la quantité de chaleur dégagée dans les fils métalliques et dans les liquides; il est arrivé à la même conclusion, pourvu que dans les liquides il n'y ait pas polarisation des lames qui servent à transmettre le courant et qu'on tienne compte des effets calorifiques produits dans la ségrégation chimique des éléments décomposés. MM. Botto et Lenz sont arrivés à la même conclusion pour les fils métalliques. Ces lois sont les mêmes que lors du passage de l'électricité libre dans les fils métalliques, comme cela résulte des recherches de M. Riess, dont on a parlé plus haut.

Lorsque des fils métalliques plongent dans différents milieux, les effets calorifiques produits par le courant électrique provenant d'une même pile, ne restent pas les mêmes ; mais ces changements tiennent à ce que, la température des fils venant à varier, leur résistance à la conductibilité change, et dès lors, la quantite de chaleur dégagée est différente. Les expériences faites par Davy en 1821 (30) ont mis ce fait nettement en évidence : lorsqu'un fil rougit dans l'air par suite du passage d'un courant énergique, si l'on place ce fil dans un liquide capable de le refroidir, tel que l'eau, l'alcool, l'huile, il cesse d'être rouge, et la quantité d'électricité qui passe est alors plus considérable, parce qu'il devient meilleur conducteur. De même, un fil étant rougi par un courant dans toute sa longueur, si l'on applique un morceau de glace sur une portion du fil rougi ou qu'on y dirige un courant d'air froid, toutes les autres parties du fil pas-

sent du rouge au rouge blanc : en effet, en refroidissant ainsi une portion du fil, on diminue sa résistance, on augmente la conductibilité du système, et, dès lors, la quantité d'électricité qui passe étant plus grande, les autres portions du fil acquièrent une température plus élevée.

Les résultats obtenus par M. Grove (31), il y a quelques années, en plongeant les fils dans différents gaz, sont analogues à ceux de Davy, et peuvent s'expliquer de la même manière : M. Grove a observé que des fils égaux développaient dans différents gaz des quantités de chaleur différentes, et que dans l'hydrogène la quantité de chaleur dégagée était plus forte que dans d'autres milieux. MM. Poggendorf et Clausius ont montré que l'effet observé tient à ce que les fils métalliques se refroidissent inégalement vite dans les différents gaz, et qu'ayant alors des températures différentes, quoique de même nature, ils ne présentent pas la même résistance à la conductibilité.

M. Becquerel (32) a montré qu'on pouvait utiliser l'élévation de température des fils de platine contournés en hélice pour produire dans différents milieux des fusions et opérer la coupellation du plomb argentifère. On introduit à cet effet, dans ces hélices, de petits creusets de différente nature ou des coupelles.

Actions calorifiques lors du changement de conducteur. Nous avons dit plus haut que dans un fil homogène la chaleur dégagée était uniforme dans toute la longueur ; mais si plusieurs fils sont liés entre eux, à la surface de jonction il se manifeste alors une élévation plus ou moins grande de température que dans les deux fils, et cela suivant le sens du courant; ces effets ont été observés par Peltier (33). Ce physicien a même trouvé que si l'on fait usage d'antimoine ou de bismuth, et que, par exemple, ces deux métaux soient soudés bout à bout, si la direction du courant est telle que l'électricité positive aille du bismuth à l'antimoine, on observe une élévation de température plus considérable que dans le reste du circuit, tandis que, si l'inverse a lieu, il se manifeste un abaissement de température aux points de jonction.

Cet abaissement de température, cette source de froid, est un des effets les plus curieux qui se produisent dans la propagation de l'électricité au travers des corps. On le rend sensible, non-seulement à l'aide de la pince thermo-électrique, mais encore, comme l'a fait également Peltier, en engageant la soudure qui présente cet effet dans la boule d'un thermomètre à air. Ce phénomène a été étudié depuis par plusieurs physiciens, parmi lesquels nous citerons

MM. Moser, Lenz (33) et Wartmann (34). M. Lenz est même parvenu à congeler une goutte d'eau versée dans une cavité pratiquée à la soudure des deux petites barres de bismuth et d'antimoine, cette eau étant d'abord préalablement refroidie afin que le moindre abaissement de température donnât lieu au changement d'état.

Il y a d'autres métaux qui présentent les mêmes effets, mais à un plus faible degré: tels sont le fer, le cuivre, etc. M. E. Becquerel (35), en étudiant ces phénomènes, a pensé qu'on pouvait les rattacher aux phénomènes déjà connus. Si l'on cherche, en effet, quel serait le sens du courant électrique développé par une faible élévation de température des soudures qui donnent lieu à un abaissement de température au-dessous de celle du circuit, on voit que ce sens serait le même que celui du courant qui donne lieu, dans le passage d'un métal à l'autre, à un abaissement de température, ou, pour mieux dire, à une élévation moindre de température à la soudure de jonction. D'après cela, il a pu formuler ainsi les effets observés :

« Lorsqu'un courant électrique, circulant dans un circuit métallique hétérogène composé de deux métaux, arrive à la surface de séparation de ces derniers, alors, l'élévation de température restant la même dans le circuit, celle qui a lieu à la surface de jonction dépend du sens du courant, l'intensité électrique ne changeant pas. Si sa direction est la même que celle du courant thermo-électrique auquel on donnerait naissance en chauffant ces métaux, l'élévation de température à la surface de jonction est moins forte; si cette direction est inverse de celle du courant électrique auquel donnerait lieu l'échauffement, l'élévation de température est plus considérable. »

M. E. Becquerel a montré qu'en poussant plus loin cette conséquence, on serait conduit à cette conclusion qu'en formant un circuit composé de deux métaux, et chauffant une des soudures, il devrait se produire un courant électrique qui agirait comme courant pour abaisser la température de cette soudure; alors cet abaissement compenserait continuellement une partie de l'échauffement dû à la chaleur communiquée par la source calorifique, ce qui semblerait donner lieu à une véritable absorption ou perte de chaleur. Cela indiquerait une transformation de chaleur en électricité. En tous cas, les effets calorifiques qui se manifestent aux surfaces de jonction des métaux indiquent un changement de résistance à la conductibilité, l'augmentation de température correspondant à une augmentation de résistance, et l'abaissement de température à un passage plus facile de l'électricité.

Lorsque la propagation de l'électricité a lieu par décharges intermittentes, comme dans l'étincelle électrique ordinaire ou d'induction, ou bien lorsqu'elle a lieu d'une manière continue entre deux corps polaires et constitue un arc voltaïque, comme dans l'expérience de Davy on a remarqué une inégalité constante de chaleur produite dans deux conducteurs polaires.

M. Neef a observé cet effet avec l'appareil électro-magnétique décrit page 93, et construit par lui en 1839; il a annoncé que le côté positif était plus chaud, et le côté négatif plus lumineux. Ces expériences ont été appuyées par MM. Moigno et Matteucci (36). M. Riess (37) a cherché à démontrer que la différence de lumière tenait à la production de décharges obscures. Nous devons dire cependant que le fait annoncé par M. Neef est contraire à celui que l'on obtient avec l'appareil d'induction beaucoup plus énergique, et qui a été décrit page 94; on observe en effet un phénomène inverse quant à la chaleur produite : en faisant passer les décharges continues d'induction entre les extrémités de deux petits fils de platine ou de fer, on voit l'extrémité négative, qui est la plus lumineuse, rougir et fondre alors que l'extrémité positive reste à une température moins élevée. Cet effet contraire tient peut-être à ce que l'on n'avait pas précisé exactement le sens de la décharge.

La différence dans l'élévation de température aux deux pôles s'observe aussi dans la production de l'arc voltaïque, où l'on a annoncé que le côté positif était plus chaud que le côté négatif, comme l'ont reconnu MM. Grove (38), Matteucci, Despretz, Moigno (39), etc.

Chaleur développée dans les couples voltaïques. Depuis Davy on a cherché à différentes reprises à prouver que la chaleur produite dans les actions chimiques, sans électricité transmise au dehors, était due à l'électricité dégagée. M. Joule a dirigé particulièrement ses recherches dans cette voie, mais il n'a pu prouver ce fait directement, quoiqu'il soit arrivé à cette conclusion, que les quantités de chaleur dégagée par la combustion des équivalents des corps sont proportionnelles à leurs affinités pour l'oxygène.

Les recherches faites dans le but de déterminer la quantité de chaleur dégagée dans les couples voltaïques, tant par suite des réactions chimiques intérieures d'un couple que dans le circuit lui-même, paraissent devoir venir à l'appui de cette assertion. M. Delarive (40), d'après le résultat de quelques expériences, a observé que lorsqu'on se sert d'un seul couple, dont le courant continu traverse des fils métalliques plus ou moins fins, la somme des quantités de chaleur

développées dans le fil et dans le liquide du couple est constante pour une même quantité d'électricité ; seulement, suivant la grosseur du fil, c'est tantôt l'une, tantôt l'autre de ces deux quantités qui est la plus considérable, et ce qui semble toujours déterminer le degré de réchauffement des différentes parties d'un circuit voltaïque, c'est la résistance qu'elles présentent.

M. Favre (41), qui a traité le même sujet, a déterminé en outre directement la quantité de chaleur produite dans les actions chimiques des couples, afin de voir si cette quantité était moindre ou plus grande lorsqu'on fermait le circuit des couples pour laisser circuler l'électricité en dehors ; il est arrivé à la suite d'expériences nombreuses à la même conclusion que M. Delarive.

M. E. Becquerel (42) a montré que cette loi, ainsi que celle qui avait été indiquée par M. Joule, se déduisait des lois de l'échauffement des conducteurs par les courants électriques, et du dégagement de l'électricité; en effet, il a démontré qu'à l'aide de ces lois simples on en déduisait par une formule les deux conclusions suivantes :

1° « La quantité de chaleur produite dans le circuit total d'un couple par le passage d'une quantité donnée d'électricité est indépendante de la résistance de ce couple ; »

2° « La quantité de chaleur provenant de l'action chimique exercée sur un équivalent d'un corps dont l'altération donne lieu au courant électrique d'un couple, est proportionnelle à la force électro-motrice de ce couple. »

D'après ces résultats et les travaux importants de MM. Joule, Mayer, Clausius, Thomson, Regnault, Soret, Grove, F. Leroux, on doit faire entrer comme élément dans la discussion des actions dynamiques la considération suivante, savoir : que pendant le développement d'actions dynamiques produites à la suite de phénomènes calorifiques, il y a une certaine quantité de chaleur qui devient latente, tant que l'action dynamique s'exerce et redevient sensible quand le travail moteur n'a plus lieu ; en d'autres termes, la chaleur doit être considérée comme une force vive qui peut produire de l'électricité, du mouvement, des élévations de température, etc., mais qui n'est capable que d'une certaine somme d'action que l'on peut appliquer à tel ou tel travail moléculaire.

Effets calorifiques produits dans l'arc voltaïque. On a vu, page 52, que Davy avait montré quelle était la puissance de l'arc voltaïque comme source de chaleur et de lumière. L'élévation de

température qui se manifeste alors est tellement considérable que M. Jacquelain (43) a pu transformer le diamant en coke avant que la combustion ait lieu.

M. Despretz (44), qui a étudié la formation de l'arc voltaïque dans différents milieux, et les effets physiques produits sur divers corps, a été conduit à réunir ensemble les trois sources les plus puissantes de chaleur que l'on possède, savoir l'action solaire au foyer d'une lentille, la combustion des gaz oxygène et hydrogène, et l'arc voltaïque, et cela pour augmenter considérablement les effets produits par ce dernier seul : il a eu par conséquent à sa disposition la plus haute source calorifique qui ait jamais été formée. En se servant d'une pile voltaïque de six cents éléments, il a obtenu les mêmes effets avec l'arc voltaïque seul.

Dans une série de travaux remarquables, ce physicien a déterminé qu'elle était l'action de cette source sur les corps simples, sur les métaux et sur les minéraux. Il a reconnu qu'il n'y avait aucun corps qui ne subît cette influence calorifique sans être brûlé, fondu ou volatilisé; il a pu fondre, par exemple, des masses assez considérables de platine et de palladium; le silicium a été fondu en un globule rayant le verre; le charbon a pu être fondu, courbé et soudé, et, quelle que soit sa nature, a pu être amené à l'état de graphite. Ces expériences ont été faites dans l'azote.

M. Despretz s'est occupé également de rechercher qu'elle est l'influence de la position des électrodes, de leur nature, du nombre des éléments de la pile et de leur disposition, sur la grandeur et les effets de l'arc voltaïque; il a pu déterminer les différentes conditions nécessaires à la production du phénomène et les différents effets physiques qui se manifestent lors de son action.

Nous devons citer encore parmi les nombreux résultats observés par M. Despretz le suivant : en se servant de deux électrodes en charbon, et transmettant la décharge de l'appareil d'induction dans le vide pendant longtemps, il a annoncé avoir obtenu des grains brillants ayant la dureté et l'apparence de fragments de diamant.

§ IV. *Effets lumineux.*

Otto de Guericke (45), qui construisit la première machine électrique, vit le premier les petites étincelles qui se manifestaient près de son globe de soufre ; mais ces effets étaient très-faibles, et c'est Wall (voir page 4) qui observa l'étincelle avec une certaine inten-

sité. Les effets lumineux qui se manifestent dans le vide furent étudiés d'abord par Hauksbée (45'), puis par Watson (46), qui fit passer l'électricité dans le double baromètre de Cavendish, et par Canton, qui imagina l'expérience du grand tube vide d'air (47).

Gray avait observé l'aigrette électrique; Beccaria (48) décrivit les circonstances de sa production et les étoiles qui apparaissent à l'extrémité des pointes. Depuis, les apparences diverses que présentent les étincelles dans les gaz raréfiés et dans l'air ont été observées par la plupart des physiciens qui se sont occupés d'électricité.

On a vu, page 51, quelles avaient été les recherches faites par Davy sur ce sujet au commencement du siècle, et comment ce physicien avait été conduit à admettre que la lumière électrique était due à l'incandescence momentanée des particules matérielles du milieu où passe l'électricité, et de celles que l'électricité arrache des conducteurs : nous allons voir que cette hypothèse a été vérifiée par les recherches faites depuis cette époque.

M. Faraday (49) a étudié d'une manière spéciale l'aigrette et les étincelles, non-seulement dans l'air et les gaz, mais encore dans des liquides tels que l'essence de térébenthine, etc. ; il a reconnu que l'aigrette dans les gaz a des caractères spécifiques indiquant que la nature du gaz a une influence plus marquée que dans la production de l'étincelle. Cet effet contraste avec le résultat obtenu quand on forme l'aigrette avec diverses substances, telles que le bois, le carton, le charbon, le nitre, etc. ; dans ce cas on n'a d'autre variation que celle qui dépend de la conductibilité.

Il a montré que dans les étincelles, ou lors de la production des aigrettes, il y avait des parties obscures, correspondant à des décharges dites obscures et qui indiquent une communication d'électricité s'opérant dans des conditions analogues à la conductibilité. Des expériences de M. Harris et de M. Riess sont venues confirmer ces observations.

M. Masson (50) a publié une série de mémoires sur la photométrie électrique, dans lesquels il a donné les résultats obtenus en mesurant l'intensité des décharges électriques fournies par des condensateurs suivant leur forme, leur charge, l'étendue des circuits, etc.; il a pu suivre ainsi la production de la lumière en rapport avec les différentes conditions physiques de la propagation de l'électricité.

Nous avons dit précédemment, page 244, en parlant de l'inégale température des pôles de la pile, que M. Neef avait observé le premier qu'avec un appareil électro-magnétique il y avait aussi

inégalité d'action lumineuse ; ces effets ont été étudiés surtout depuis la construction de l'appareil d'induction cité page 94, par MM. Masson et Breguet, Quet, Grove, etc., et on les obtient à l'aide de cet appareil avec une grande netteté ; on reconnaît que dans l'œuf électrique, par exemple, la boule négative est entourée d'une auréole bleue, et que la boule positive est le point de départ d'une gerbe rouge violacée ; nous avons dit également, page 95, que la lumière électrique présentait une stratification particulière qui a été rapportée au retard éprouvé par la décharge induite.

Lorsque l'on produit l'arc voltaïque dans les conditions ordinaires et à l'aide d'une pile d'un grand nombre d'éléments, indépendamment des effets de chaleur, cet arc émet une très-grande quantité de lumière. Cette lumière se trouve inégalement répartie, et vers les pôles elle est plus vive qu'au milieu de l'arc entre les conducteurs ; d'après MM. Matteucci, Foucault et Fizeau, Delarive, Despretz, le pôle positif est le plus brillant.

Composition de la lumière électrique. La lumière électrique, comme la lumière solaire et les lumières artificielles, n'est pas simple ; elle émet des rayons dont la réfrangibilité dépend de la nature du milieu traversé par l'étincelle et de celle des corps entre lesquels cette dernière éclate. Wollaston (51) en 1802, qui a analysé le premier cette lumière, a reconnu que le spectre résultant du passage de ses rayons au travers d'un prisme était formé de bandes colorées dont la composition n'était pas la même que celle de la lumière solaire.

Fraunhofer en 1817 (52) a trouvé aussi de grandes différences avec le spectre solaire sous le rapport des raies et des bandes ; il a distingué dans le spectre de la lumière électrique plusieurs lignes brillantes ou parties très-claires, dont l'une, qui se trouve dans le vert, est remarquable en comparaison du reste du spectre. L'orangé renferme une ligne moins lumineuse, dont la couleur paraît être la même que celle de la ligne claire du spectre de la flamme d'une lampe.

M. Wheatstone (53) en 1835, en étudiant avec un télescope muni d'un micromètre la composition du spectre de la lumière électrique provenant des étincelles d'induction, observa que les couleurs varient avec la nature des métaux entre lesquels elles éclataient ; il reconnut qu'avec les mêmes métaux, dans l'air ou dans le gaz, les raies brillantes que l'on voyait dans le spectre des étincelles étaient les mêmes. Ces raies ne provenaient donc pas de la combustion des métaux, mais plutôt de leur transport à l'état d'incandescence.

M. Masson (54) a étudié d'une manière spéciale la composition de la lumière électrique en variant les sources d'électricité et excitant les étincelles ou les décharges dans différents milieux et entre les conducteurs de diverse nature. Il a été conduit d'abord à la même conclusion que M. Wheatstone, savoir, que dans les gaz les raies brillantes étaient les mêmes que dans l'air; en outre, ayant vu que dans les liquides les raies brillantes avaient disparu, il en a conclu qu'alors le transport des particules incandescentes n'a plus lieu, et que, dans ces conditions, les raies brillantes des spectres sont dues uniquement à l'illumination des particules incandescentes arrachées aux conducteurs, et non pas à celles des milieux qui sont traversés par l'électricité. Cette dernière cause donne lieu à la partie lumineuse des étincelles sans production de raies brillantes.

Avec l'arc voltaïque continu, M. Masson a obtenu des effets du même genre en réfractant la lumière de l'arc voltaïque formé dans l'air et sillonné de raies brillantes qui changent avec la nature des conducteurs, comme lorsqu'on étudie les spectres des étincelles. Quand on le produit à la même place et que l'on compare les raies obtenues entre les mêmes pôles métalliques, en faisant usage des étincelles, puis des arcs, on trouve dans les spectres voltaïques des raies qui ont leurs analogues dans ceux des étincelles; mais beaucoup d'entre elles manquent. Il attribue le moins grand nombre de raies brillantes du spectre de l'arc voltaïque à ce qu'il est produit par un faible excès de tension électrique, et qu'il se comporte comme étant formé d'une succession d'étincelles moins vives que les étincelles ordinaires.

La position des raies brillantes dans les spectres de la lumière de la pile est indépendante de l'intensité du courant, car M. Despretz (55) s'est assuré qu'en employant une pile de 100 éléments ou une pile de 600, une raie fixe ne variait pas de position dans le spectre observé à l'aide d'une lunette.

Intensité lumineuse. Appareils régulateurs. La plupart des expérimentateurs qui ont étudié l'arc voltaïque ont comparé son intensité lumineuse à celle d'une source prise pour unité et en général à celle d'une lampe ou d'une bougie, et cela suivant le nombre de couples employés et leur grandeur; nous citerons notamment MM. Bunsen (56), Foucault et Fizeau (57), Despretz (58), Grove, E. Becquerel (59). On peut dire qu'en moyenne l'intensité lumineuse de l'arc voltaïque formé par une pile de 50 à 60 éléments entre deux conducteurs en charbon varie de 350 à 500 bougies

stéariques; les nombres obtenus dépendent, bien entendu, de la résistance des couples, de leur force électro-motrice, de la résistance des circuits, et surtout de l'état des conducteurs entre lesquels l'arc éclate. M. E. Becquerel, en résumant ces différentes conditions, a montré quel était le prix de revient de l'éclairage à l'aide de l'électricité, ainsi que celui qui résulte de l'emploi des autres sources lumineuses habituelles. MM. Thury et E. Wartmann (59') ont également publié dernièrement des recherches sur l'éclairage électrique.

La puissante lumière que développe l'arc voltaïque dans l'expérience faite pour la première fois par Davy en 1813 (voir page 52), ne saurait être employée dans l'industrie qu'autant que l'on peut rapprocher les charbons placés dans l'air ou dans le vide au fur et à mesure que le transport des molécules incandescentes et la combustion diminue la longueur des conducteurs; on y est parvenu à l'aide d'appareils nommés *régulateurs de lumière électrique*, et dans lesquels le courant lui-même, qui forme l'arc, par une action électromagnétique qu'elle augmente ou diminue suivant que l'arc est trop court ou près de se rompre, permet aux charbons de rester à une distance telle que l'arc se conserve permanent pendant une ou plusieurs heures. MM. Staite et Petrie en Angleterre (60), et M. Foucault (61) en France, ont construit, vers 1843 ou 1844, les premiers régulateurs qui aient fonctionné; depuis on les a perfectionnés. Nous citerons notamment parmi ceux qui servent maintenant aux démonstrations dans les cours publics, à l'éclairage des travaux de nuit, à l'éclairage sous l'eau, et dans les cas spéciaux où l'emploi de la lumière électrique est utilisé avec tant d'avantage, les régulateurs de MM. Archereau, Deleuil, Dubosc, Lacassagne et Thiers, etc.....

Dans l'étude des effets mécaniques et physiques de l'électricité, deux résultats importants pour la science ont été obtenus : 1° les lois de la production de la chaleur dans les circuits simples et composés, et auxquels ont concouru les physiciens que nous avons nommés, lois qui montrent la liaison intime des phénomènes électriques et calorifiques; 2° les effets calorifiques et chimiques de l'arc voltaïque obtenus par M. Despretz dans des expériences qui sont une des manifestations les plus belles des puissants moyens que la science a mis à la disposition de l'homme.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE X.

(1) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. III, p. 365.
(2) *Idem*, t. I, p. 392.
(3) *Nicholson Journal*, vol. XXXII, p. 176. — Singer, *Traduction française*, p. 182.
(4) *Philosoph. trans.*, vol. XI, p. 371.
(5) *Journal de physique*, floréal an x, p. 357.
(6) *Comptes rendus de l'Academie des sciences de l'Institut*, t. VIII, p. 493.
(7) Priestley, *Histoire de l'électr.*, t. II, p. 435.
(8) *Idem*, t. II, p. 208.
(9) *Annales de chim. et de phys.*, 3e série, t. XLV, p. 420.
(10) Muschenbroeck, *Introd. ad philos. nat.*, § 944.
(11) Priestley, *Histoire de l'électr.*, t. III, p. 325.
(12) *Journal de Pavie depuis* 1821 *jusqu'en* 1825 ; 1825, p. 405. — *Archives de l'électricité*, *Genève*, t. III, p. 597.
(13) *Repertor. der physik*, vol. VI, p. 180. — *Mém. de l'Academie de Berlin*, t. XXXIV. — *Archives de l'electricite*, *Genève*, t. II, p. 591.
(14) *Ann. de Pogg.*, t. LVII, p. 497. — *Archives de l'electricité*, *Genève*, t. II, p. 677 ; t. III, p. 310 ; t. IV, p. 457.
(15) *Archives d'electricité*, *Genève*, t. V, p. 115.
(16) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences de l'Institut*, t. XVI, p. 762 et 1152.
(17) *Idem*, t. XV, p. 119, 448, 855, 1200.
(18) Becquerel, *Traité d'électr.* en 7 vol., t. III, p. 101.
(19) *Ann. de chimie et de physique*, 3e serie, t. XXXVII, p. 242.
(20) *Idem*, t. XVIII, p. 610.
(21) Van Marum, t. I, p. 112.
(22) *Bibliothèque univ. de Genève*, 2e série, t. XXVIII, p. 342.
(23) *Archives de l'electricité de Genève*, t. V, p. 5.
(24) *Ann. de chim. et de phys*, 3e série, t. XXXV, p. 62.
(25) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XI, p. 947 ; t. XLIII, p. 34.
(26) *Philosophical transact.*, 1834.
(27) *Biblioth. univ. de Genève*, 1839, t. XXII, p. 367. — *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. LXIX, p. 113, et t. LXXIV, p. 158. — *Archives de l'electr.*, t. I, p. 555. — *Archives des sciences physiques de Genève*, t. I, 194 et t. XVII, p. 48. — Riess, *Traité d'électricité*.
(28) *Philosoph. mag.*, oct. 1841. — *Archives de l'électr.*, *Genève*, t. II, p. 54.
(29) *Ann. de chimie et de physique*, 3e serie, t. IX, p. 21. — *Comptes rendus de l'Academie des sciences*, t. XVI, p. 724.
(30) *Journal de physique*, 1822, t. XCIV, p. 226.
(31) *Philosoph. mag.*, 3e série, t. XXXV, p. 114, juillet 1849. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e serie, t. XXXIX, p. 497.
(32) Becquerel, *Traité de physique* en 2 vol., t. I, p. 512.
(33) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. LVI, p. 371.

(33[1]) *Ann. der phys. and chem.*, vol. XLIV, c. 2. —*Biblioth. univ. de Genève* t. XVII, p. 387.

(34) *Archives de l'électricité de Genève*, t. I, p. 74.

(35) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XX, p. 53.

(36) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences de l'Institut*, t. XXIX, p. 263; t. XXX, p. 201.

(37) *Ann. de Pogg.*, t. XCXI, p. 290. — *Ann. de chim. et de phys.*, t. XLI, p. 205.

(38) *Philosoph. magasine*, 1840.

(39) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences de l'Institut*, t. XXX, p. 359.

(40) *Archives de l'électr., Genève*, t. III, p. 178.

(41) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XL, p. 293.

(42) *Idem*, t. XLVIII, p. 282.

(43) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences de l'Institut*, t. XXIV, p. 1050.

(44) *Idem*, t. XXVIII, p. 755; t. XXIX, p. 48, 545, 709; t. XXX, p. 367.

(45) Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 14 et 102; t. III, p. 418.

(45[1]) Hauksbée, *Experiences physico-mécaniques*.

(46) Priestley, *Hist. de l'électr.*, t. II, p. 105. — (47) *Idem*, t. III, p. 165. — (48) *Idem*, t. II p. 130.

(49) *Philosoph. transact.*, 1838. — Faraday, *Experiment. researches in electricity*, p. 417.

(50) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XIV, p. 129; t. XXX, p. 5.

(51) *Philosoph. transact.*, 1802, p. 380.

(52) *Biblioth. univ. de Genève*, t. VI, p. 21, 1817. — *Mémoires de l'Académie de Munich.*

(53) *Comptes rendus de l'association britannique pour l'assoc. des sciences.* Dublin, 1835. — Becquerel, *Traité d'électricité*, t. IV, p. 34.

(54) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXI, p. 295; t. XLV, p. 385.

(55) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences de l'Institut*, t. XXXI, p. 418.

(56) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. VIII, p. 34.

(57) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. XVIII, p. 746 et 860.

(58) *Idem*, t. XXXI, p. 418.

(59) *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 1857, nouv. série, t. IV, p. 529.

(59[1]) *Archives des sciences physiques de Genève*, 4e série, t. XXXVI, p. 310, 323.

(60) *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'indust. nation.*, 1849, 2e série, t. XLVIII, p. 46.

(61) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences de l'Institut*, t. XVIII, p. 696.

CHAPITRE XI.

Action physiologique de l'électricité, et son emploi thérapeutique, principalement depuis 1820 jusqu'à l'époque actuelle.

---

§ I. *Action de l'électricité sur les végétaux.*

Les végétaux sont infiniment moins excitables que les animaux sous l'influence de l'électricité : quelques plantes, la *Mimosa sensitiva* et la *Mimosa pudica* font exception ; en employant toutefois une pile d'une certaine énergie, comme Giulio de Turin l'a montré, les feuilles se ferment aussitôt que le courant les affecte. Si les décharges électriques ont quelque puissance, elles font perdre aux vaisseaux de certaines plantes la faculté de se contracter pour chasser la séve en dehors, ainsi que Van Marum l'a observé (1).

MM. Becquerel et Dutrochet (2) ont étudié l'influence exercée par l'électricité voltaïque sur la circulation de la séve dans une tige de Chara ; le courant produit dans les premiers instants un engourdissement, en rapport avec son intensité, quel que soit le sens du courant : la circulation s'arrête, puis reprend avec sa vitesse primitive ; si le courant est plus intense, nouvel arrêt constaté, ainsi de suite, jusqu'à une certaine limite. Le passage de l'électricité ne produit aucune désorganisation, et ne fait que contrarier momentanément la circulation de la séve. Des effets semblables se produisent aussi probablement dans tous les corps organisés où des liquides sont en circulation.

Dans ces expériences, l'électricité n'agit que comme force physique ; on a cherché aussi comment elle se comportait comme force chimique. Davy (3) a avancé que le blé germe plus vite dans l'eau pure électrisée positivement que dans celle qui l'est négativement. L'effet n'a lieu, entre certaines limites d'intensité de courant, que parce qu'au pôle positif les graines sont entourées d'une atmos-

phère d'oxygène ; si Davy eût continué plus longtemps ses expériences, la plantule aurait fini par être décomposée par suite des acides déposés ou produits par une action secondaires, comme M. Becquerel (4) l'a prouvé: dans une série d'expériences, il a montré que, contrairement à l'opinion de Davy, sous l'influence de forces électriques faibles, l'action du pôle négatif active la végétation, sans doute en raison des produits alcalins secondaires qui s'y déposent.

M. Becquerel a tiré de ses recherches les conséquences suivantes : 1° dans la germination, les éléments de la graine, éprouvant sans cesse des changements, se trouvent dans des états électriques dépendant du rôle que chacun d'eux joue dans les réactions; ils obéissent bien mieux par conséquent à l'action du courant que si cet état n'existait pas; 2° quelles que soient les causes agissantes, il paraît prouvé que l'on peut employer avec avantage dans la germination, et même dans les autres actes de la végétation, l'action électro-chimique du pôle négatif, même celle d'un seul couple; on met cette propriété en évidence en plaçant au pôle négatif des graines, de jeunes plantes, des bulbes de jacinthe ou autres.

§ II. *Action physiologique produite par l'électricité sur les animaux.*

L'électricité est de tous les stimulants celui qui agit le plus énergiquement et le plus longtemps pour exciter les nerfs, puisqu'elle produit encore des effets alors que tout autre moyen est sans action pour provoquer l'excitabilité nerveuse. Les moyens employés jadis étaient le frottement et le pincement, indiqués par Duverney (5) en 1700; l'action d'un corps chaud ou d'un agent chimique, comme l'a montré Haller.

On avait annoncé que l'électricité à forte tension accélérait les pulsations du pouls, et par suite la circulation du sang, et que la transpiration insensible était augmentée; Van Marum (6) a obtenu constamment des résultats négatifs avec la grande machine du musée de Teyler. On s'était appuyé pour le prouver sur les effets produits par l'électricité pendant l'écoulement des liquides dans les tubes capillaires; mais on a démontré que cette comparaison n'était pas exacte; effectivement : quand on ouvre la veine à une personne qui est isolée et qu'on électrise, il y a accélération dans le jet du sang, mais il y a ralentissement quand cette personne touche le sol. En premier lieu, l'électricité n'exerce son action

répulsive que parce que la veine est ouverte; si elle ne l'était pas, toute l'électricité se porterait à la surface du membre et serait sans effet sur le mouvement circulatoire du sang.

Van Marum, qui a beaucoup expérimenté sur des animaux avec une très-forte batterie électrique, a été conduit à cette conséquence que le système nerveux est particulièrement affecté et même détruit; ce système étant frappé de mort immédiate, le cœur et les artères perdent leur irritabilité.

Les effets dus à l'électricité voltaïque sont plus variées et sont de nature à nous éclairer sur le rôle que peut jouer l'électricité dans les phénomènes de la vie. Volta et Fowler (7) remarquèrent les premiers que la grenouille se contracte souvent quand elle cesse de faire partie d'un circuit voltaïque. Ce fait a été observé depuis par divers physiciens, entre autres par Ruthford et par Paff (8); ce dernier considérait ce fait comme une objection contre la théorie de l'électricité animale de Galvani. Pour expliquer ce phénomène, il admet que l'électricité, en se mouvant dans les nerfs en sens contraire de leur ramification, fait naître une secousse à l'instant seulement où elle cessait d'y pénétrer; cette explication était loin d'être satisfaisante.

Lehot (9) a étudié de nouveau ce phénomène en précisant, mieux qu'on ne l'avait fait avant lui, les conditions nécessaires pour le succès de l'expérience : il fit voir que, lorsque le nerf avait une armature de zinc et le muscle une armature d'un autre métal moins oxydable, la contraction avait lieu au moment de la fermeture du circuit; tandis qu'en intervertissant les armatures, les contractions se manifestaient à l'instant où le circuit était interrompu. Il observa en outre qu'en plaçant une lame de zinc sur la langue et la touchant avec une pièce d'argent tenue à la main, il se manifestait aussitôt une saveur particulière; en opérant inversement, la saveur n'avait lieu qu'en ouvrant le circuit. Il fut démontré par là que le courant, en agissant sur le nerf, jouissait non-seulement de la propriété de faire contracter le muscle correspondant en ouvrant ou fermant le circuit, mais encore de produire une sensation dans les mêmes circonstances.

M. Marianini (10), en 1829, fit quelques recherches sur la secousse qu'éprouvent les animaux au moment où ils cessent de faire partie d'un circuit voltaïque.

Nobili (11), la même année, reprit cette question : en faisant passer un courant simple dans les nerfs de la grenouille récemment

préparée, il fut conduit à cette conséquence que les lois de la contraction varient dans cinq périodes différentes de vitalité du nerf. Marianini (12) n'admit pas cette conséquence : en répétant les expériences de Lehot et de Bellingeri, il trouva que le courant direct (courant du cerveau aux extrémités du nerf) produisait une sensation quand il était interrompu, tandis que cet effet avait lieu avec le courant inverse à l'instant où l'on fermait ce circuit.

Marianini a résumé ainsi la loi générale de l'action du courant sur les animaux vivants ou récemment tués :

Courant direct	En commençant	Contraction des muscles inférieurs.
	Circuit fermé	Rien.
	En ouvrant le circuit	Sensation.
Courant inverse	En commençant	Sensation.
	Circuit fermé	Rien.
	En ouvrant le circuit	Contraction des muscles inférieurs.

Le désaccord entre ces résultats et ceux que Nobili avait obtenus engagea M. Matteucci à faire de nouvelles expériences sur ce sujet; voici, en résumé, quelles en ont été les conséquences (13) : lorsque le courant est interrompu, les contractions des muscles inférieurs deviennent plus faibles, et subsistent au contraire pour les muscles du dos; les oreilles sont toujours agitées, et on entend souvent un cri; à l'instant où commence le courant, les contractions ne s'observent que dans les muscles inférieurs. Quant au courant inverse, à l'instant où il commence, il y a contraction des muscles du dos, battement des oreilles, et presque toujours cri; lors de l'interruption, les contractions des muscles inférieurs subsistent, mais tous les autres effets disparaissent. Ces observations complètent celles de Marianini.

Valli (14) avait montré le premier qu'en soumettant à l'action d'un courant les différentes parties d'un nerf dans le sens de sa longueur, la partie la plus rapprochée du cerveau était celle qui devenait d'abord insensible, puis successivement les parties les plus éloignées. M. Matteucci (15), en opérant avec le courant inverse sur les nerfs des animaux vivants, a trouvé la même loi pour les phénomènes de la douleur et des contractions des muscles supérieurs qui sont produites quand ce courant commence. Lorsque la sensibilité devient moindre, il faut que le courant traverse des portions plus rapprochées du cerveau et plus éloignées des muscles que celles sur lesquelles le courant agissait en commençant.

On connaît les effets physiologiques produits quand on irrite le nerf d'un animal vivant ou récemment tué, au-dessus ou au-dessous d'une ligature : en premier lieu, il n'y a point de contraction dans les muscles inférieurs, mais l'animal crie et éprouve de la douleur; en second lieu, les contractions sont très-fortes, sans que l'animal donne des signes de douleur. Les physiologistes avaient admis que la ligature du nerf n'empêchait pas tout à fait l'action d'un courant appliqué au-dessus de la ligature. M. Matteucci (15), qui a repris ces expériences, a reconnu que le courant agit comme les autres agents stimulants.

Ce physicien a également étudié l'action des poisons sur l'irritabilité nerveuse, ou du moins il a cherché comment variait cette irritabilité; en administrant du poison aux grenouilles, il a reconnu, comme l'avait fait M. de Humboldt vers la fin du dernier siècle, que le gaz acide carbonique, l'azote, le chlore et le gaz sulfhydrique ne diminuent pas l'excitabilité du nerf sous l'influence du courant, tandis que l'acide cyanhydrique l'affaiblit. Les poisons narcotiques produisent des effets remarquables : une grenouille, après quinze à trente minutes, est dans un tel état de surexcitation que la moindre contraction agite l'animal; après quoi viennent les contractions tétaniques, et quelques minutes après les mouvements finissent : dans la première période le nerf est encore très-excitable par l'action du courant; dans la seconde période, pendant l'action tétanique, en opérant d'une certaine manière et laissant le circuit fermé, la tension des muscles cesse et se relâche; enfin, dans la dernière période, le nerf a perdu son excitabilité.

Nous sommes amenés à parler des circonstances diverses qui apportent des modifications dans les cordons nerveux des animaux vivants ou récemment tués, par l'action du passage du courant.

Valli (16), en 1792, avait reconnu que le courant électrique, quel que soit son sens, ne donne point de contraction tant qu'il circule; cela n'a lieu toutefois que lorsque le courant est très-faible, car, s'il a une certaine énergie, on observe dans les premiers instants des contractions violentes et même tétaniques qui durent plus ou moins de temps, suivant l'excitabilité de l'animal et l'intensité du courant.

Marianini (17) a reconnu que, si l'on ouvre le circuit et que l'on change le sens du courant, la contraction reparaît; on peut, en intervertissant un certain nombre de fois le sens du courant, annuler

ou rappeler à volonté l'excitabilité des muscles : c'est en cela que consistent les *alternatives voltaïques.*

En comparant deux grenouilles, dont l'une est parcourue par un courant continu, toujours dans le même sens, et l'autre par un courant dirigé tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, la première est celle qui perd le moins d'excitabilité dans les nerfs ; dans l'animal vivant, de semblables effets sont produits, seulement les forces vitales réparent promptement les atteintes portées par le courant aux organes de la vie (18).

On vient de voir qu'un courant électrique continu modifie l'excitabilité du nerf ; mais, si un courant de même force est interrompu et rétabli à de courts intervalles, la modification est plus rapide et plus profonde : ce fait a été signalé par Nobili, Marianini, confirmé par M. Matteucci, et démontré d'une manière évidente par M. Masson (19), au moyen d'une roue métallique portant à sa circonférence des parties isolantes et des parties métalliques, introduites dans le circuit formé par une pile et une bobine électro-magnétique, cette roue servant à interrompre et à rétablir le courant électrique. Lorsque la vitesse de rotation de la roue est assez rapide, la contraction involontaire que l'on éprouve est si forte que l'expérimentateur ne peut abandonner le conducteur métallique qu'il tient à la main. La vitesse de rotation devenant considérable, la sensation et les secousses finissent par disparaître, probablement en raison de la production des courants induits qui annulent l'effet du courant principal.

Dans les expériences précédentes le courant traversait longitudinalement le nerf ; mais si on le dirige dans l'épaisseur d'un tronc nerveux moteur, M. Longet (20) a reconnu qu'il n'y avait pas de contraction.

§ III. *Action voltaïque sur les nerfs du mouvement et les nerfs du sentiment ; nerfs spéciaux.*

Nous avons dit précédemment que l'on s'était particulièrement attaché à étudier l'action du courant électrique sur les nerfs lombaires et sciatiques des animaux, nerfs qu'on appelle mixtes ; les cordons qu'ils forment sont composés de filets qui président, les uns aux sensations, les autres aux mouvements, comme l'a découvert Charles Lebel en 1811. Cette découverte, mise en évidence par Magendie, puis étudiée par Muller, sur les fonctions différentes des

faisceaux de la moelle épinière et des nerfs rachidiens, a conduit MM. Matteucci et Longet (21) à rechercher si la loi obtenue à l'égard des nerfs mixtes avait lieu également sur les parties du système nerveux dont l'action est exclusivement motrice; ces recherches ont été particulièrement dirigées sur les racines spinales antérieures et sur les faisceaux correspondants de la moelle épinière, en employant successivement le courant direct et le courant inverse.

MM. Matteucci et Longet ont reconnu que la contraction des muscles correspondant à la racine antérieure a lieu d'abord confusément au commencement et à la fin du courant, quel que soit le sens du courant; mais qu'après un certain temps les effets deviennent nets et durables, et les contractions n'ont plus lieu qu'au commencement du courant inverse et à l'interruption du courant direct. Ces effets, qui sont opposés à ceux que l'on obtient avec les nerfs mixtes, ont été constatés sur le cheval, le lapin et la grenouille. Les faisceaux latéraux agissent avec les courants direct et inverse, comme les faisceaux antérieurs, en produisant toutefois des secousses convulsives moins persistantes et moins énergiques. Ces expériences, sur lesquelles nous ne pouvons nous étendre davantage, ont donné les moyens au physiologiste de distinguer les nerfs du mouvement de ceux du sentiment.

Or, si avec un certain degré d'excitabilité, les nerfs mixtes n'excitent les contractions musculaires qu'au commencement du courant direct, et à l'interruption du courant inverse, et si les nerfs exclusivement moteurs ne les produisent qu'à l'interruption du premier et au commencement du second, ce sont là des conséquences importantes pour la physiologie (22).

Suivant le Hot et Marianini (23), chez un animal vivant, les signes de douleur se manifestent au moment où le courant direct cesse, ou bien quand le courant inverse commence; M. Matteucci a avancé que dans la première période, la douleur a lieu en fermant et en ouvrant le circuit, et que les phénomènes observés par le Hot et Marianini n'ont lieu que dans la seconde, c'est-à-dire lorsque le courant a circulé pendant quelques instants.

M. Longet, au lieu d'opérer sur des grenouilles et des lapins, chez lesquels les indices de sensibilité sont difficiles à établir, a pris des chiens et des chats, qui expriment vivement leurs sensations douloureuses; il a reconnu que la douleur se manifeste au début des courants direct et inverse, à l'interruption du courant

inverse seulement, et jamais à l'interruption du courant direct, ce circuit étant fermé pendant les premiers moments du passage continu de l'un ou de l'autre courant.

Volta (24) a démontré le premier qu'en excitant le nerf optique avec un courant électrique, on éprouve une sensation lumineuse; en dirigeant le courant transversalement d'une oreille à l'autre, on entend un sifflement, un bruit saccadé, qui persiste tant que le circuit reste fermé (25). Le courant dirigé dans les fosses nasales produit, selon quelques observateurs, une odeur phosphorée ou d'autres sensations olfactives. D'un autre côté, l'expérience de Sulzer, rapportée page 23, fait connaître la sensation produite sur la langue par l'action du courant.

L'influence de l'électricité sur les diverses parties de l'encéphale des chiens, des chats, etc., est nulle dans la substance blanche des hémisphères cérébraux et sur les deux substances du cervelet, quel que soit le sens du courant pour mettre en jeu la contraction musculaire involontaire et pour développer des secousses convulsives (26). Il n'en est pas de même des tubercules quadrijumeaux ou bijumeaux : les pédoncules cérébraux sont affectés par le courant; il en résulte, au contraire, des mouvements convulsifs dans le tronc, les membres.

Les faits que nous venons d'énumérer, touchant l'action exercée par l'électricité sur les nerfs, montrent combien cette action est puissante et variée, et de quel secours elle peut être pour l'étude des phénomènes physiologiques et la pratique médicale.

§ IV. *Action chimique de l'électricité sur l'organisme.*

Grapengiesser avait reconnu que les conducteurs d'un appareil voltaïque étant appliqués sur la peau dénudée, il en résultait une sécrétion plus abondante de sérosité; si la peau était simplement mouillée, il se formait assez promptement une escarre.

M. de Humboldt (27) a également observé des effets remarquables: en se faisant appliquer deux vésicatoires sur les épaules, il fit couvrir l'une des plaies avec une plaque d'argent, l'autre avec une plaque de zinc, les deux plaques en relation avec un fil d'argent; il provoqua par ce moyen un nouvel écoulement d'humeur, accompagné d'une cuisson très-douloureuse. Il fit ouvrir les deux vésicules pour en faire sortir la sérosité : l'humeur qui en sortit, au lieu d'être blanche, était d'un rouge vif. Cette expérience fut répétée

par M. Reynold sur plusieurs malades atteints d'ulcères. Les acides et les alcalis mis à nu par le courant doivent réagir sur les plaies, et produire des effets pathologiques.

Ces résultats engagèrent M. Orioli à proposer de changer la nature de la sécrétion d'une plaie, dans l'espoir d'arriver à une guérison plus prompte, de même que l'on rend un métal oxydable électro-négatif pour l'empêcher d'être oxydé dans le milieu où il se trouve.

M. Mansford a fait usage de ce mode d'expérimentation en se servant d'un seul couple composé de deux disques, l'un de zinc, l'autre de cuivre, qui étaient maintenus avec des bandages convenables et humides : cette méthode présente des inconvénients graves, attendu que les sels métalliques formés peuvent produire des effets fâcheux sur les plaies. Il faut agir avec deux lames de platine en relation avec un appareil voltaïque, et les nettoyer fréquemment, afin d'enlever les corps déposés, lesquels tendent à produire un courant en sens inverse. C'est ainsi que l'un de nous a agi, conjointement avec M. Breschet, à l'Hôtel-Dieu de Paris, sur un malade qui avait à la jambe un ulcère rebelle ; on est parvenu ainsi, en dénaturant la nature de la sécrétion, à obtenir une guérison complète. Il serait à désirer que de nouvelles expériences fussent faites dans cette direction.

§ V. *Emploi de l'électricité dans la thérapeutique. Cautérisation galvanique.*

Avant la découverte de la pile, on administrait l'électricité aux malades avec les machines, soit en tirant les étincelles de diverses parties du corps, comme Jalabert (28), Bertholon (29) ; soit sous forme de bains, comme Mauduyt (30), en plaçant le patient sur un tabouret isolant et le mettant en communication avec une machine électrique ; soit en employant la bouteille de Leyde : tous les auteurs de Traités de physique du siècle dernier préconisèrent l'emploi médical de l'électricité dans une foule de maladies, surtout dans les cas de paralysie (31).

La découverte de la pile a fourni un autre mode beaucoup plus énergique d'appliquer l'électricité à l'art de guérir. Les expériences intéressantes de M. de Humboldt, sur l'irritation galvanique des muscles et des nerfs (page 29); celles d'Aldini (32), en 1806, sur l'emploi du galvanisme dans un grand nombre de maladies ; l'introduction d'aiguilles d'acier ou de platine dans les muscles

pour faire pénétrer plus avant les courants dans l'organisme, comme l'ont fait Sarlandière et Petrequin par le procédé de l'acupuncture, laissèrent entrevoir la possibilité d'utiliser l'électricité sous forme de courant dans différents cas morbides.

Mais si l'électricité, quelle que soit son origine, n'a pas répondu toujours jusqu'ici à l'espérance des premiers expérimentateurs, on ne saurait nier que dans certaines circonstances il n'y ait eu des résultats avantageux, surtout lorsqu'il s'agit de stimuler un organe qui ne fonctionne pas normalement. L'électricité agit comme force physique ou comme force chimique : dans le premier cas, elle produit des contractions ou un dérangement momentané dans l'équilibre des molécules organiques. Si l'on se reporte aux effets produits dans les alternatives voltaïques (page 258), on conçoit que le passage continu du courant dans les nerfs peut être employé utilement dans certaines maladies nerveuses résultant d'un état de surexcitation, attendu que les nerfs qui ont été parcourus par un courant pendant un certain temps perdent momentanément la faculté de faire contracter les muscles correspondants sous l'influence d'un courant de même intensité ou de moindre intensité que le premier. Pour appliquer les courants continus on fait usage d'éponges imbibées d'eau salée, de lames de platine ou d'aiguilles de même métal, dont il a été fait mention plus haut. Avec les aiguilles, il se forme autour des pointes des dépôts et des substances acides ou alcalines qui peuvent déterminer par leur réaction une inflammation dans les parties contiguës.

Jusqu'ici ce mode a été peu employé ; on s'en tient aux courants interrompus, dont l'effet est de surexciter les nerfs et par suite les muscles, et qui ne sauraient convenir dans le cas où le système nerveux est dans un état permanent ou passager de surexcitation ; dans ce cas, il faut opérer comme on vient de le dire. Les courants interrompus s'administrent avec des machines électriques ordinaires, avec la pile ou avec des appareils d'induction. Aujourd'hui on fait usage presque exclusivement de ces derniers, dont on a varié la forme. La différence des effets observés sous le rapport des contractions plus ou moins fortes qu'on éprouve et des douleurs plus ou moins vives que l'on ressent tient non pas tant à l'intensité du courant mis en jeu qu'à l'instantanéité de son action et à la succession plus ou moins rapide des intermittences que l'on produit.

Parmi les maladies auxquelles on a appliqué et on applique encore le traitement électrique, il faut mettre en première ligne la

paralysie. Ce traitement a produit quelquefois des effets avantageux, d'autres fois une amélioration sensible ; le plus souvent il n'a pas répondu à ce qu'on en attendait. M. Magendie (33) en a fait usage quelquefois avec succès dans l'affaiblissement de la vue, provenant d'une amaurose incomplète ; il dirigea à cet effet le courant à travers les nerfs de l'orbite. On l'emploie aussi dans la surdité et l'aphonie incomplètes, en excitant les nerfs auditifs. Lorsque la paralysie est complète et que la vie est éteinte dans les nerfs, les courants électriques sont impuissants pour rendre aux muscles la faculté de se contracter.

MM. Marianini (34), Nobili (35), Matteucci (36), ont donné chacun une méthode de traitement pour la paralysie. Marianini recommande que l'on ait égard au sens du courant ; Nobili conseille les courants discontinus ; dans le tétanos, au contraire, il préfère le premier mode.

M. Andrieux (37), dans un travail sur l'électricité médicale, a envisagé l'emploi sous un point de vue général, et restreint beaucoup le cas des maladies dans lesquelles on peut employer l'électricité avec succès.

M. Masson (38), dans un travail sur l'induction, avait montré que l'on pouvait faire contracter un muscle en posant sur la peau, en certains endroits, les conducteurs de l'appareil électrique. Ce mode d'employer l'électricité a été généralisé depuis par M. Duchenne ; en effet, M. Duchenne (39) fait contracter tel ou tel muscle en appliquant seulement à la surface de la peau des conducteurs humides, des tiges métalliques pourvues d'éponges imbibées d'eau salée, et dirigeant convenablement l'action des courants. Si la peau est sèche, ainsi que les excitateurs, l'électricité ne traverse pas le derme et produit des étincelles sans phénomènes physiologiques ; si l'un des excitateurs est humide et l'autre sec, le point touché par l'excitateur éprouve une sensation superficielle cutanée. Lorsque la peau est légèrement mouillée, la sensation superficielle cutanée est sensiblement plus forte ; mais, en rendant humides la peau et les excitateurs, il se produit des phénomènes de contraction et de sensibilité très-variables suivant qu'on agit sur un muscle ou sur un nerf ; dans ce dernier cas, on détermine une vive douleur. C'est par de tels moyens que M. Duchenne est parvenu à arrêter l'effet de l'électricité sur la peau, et à le limiter à volonté dans les organes qu'elle recouvre. Ce procédé permet donc, comme les précédents, mais avec plus de facilité, d'exciter seulement les

parties malades dans certains cas de paralysie, et peu à peu de faire mouvoir les muscles qui avaient perdu toute faculté de contraction.

On doit à M. Alfr. Becquerel (40) des observations intéressantes sur l'emploi de l'électricité dans les maladies, et qu'il a eu l'occasion de faire dans sa pratique médicale. Il a constaté, comme Marshall l'avait établi et M. Duchenne l'avait vérifié, que la contractilité électro-musculaire demeure intacte dans les muscles paralysés sous l'influence d'une hémorragie cérébrale; il a trouvé que, dans plusieurs cas de la maladie de la moelle, l'intensité de la contractilité électro-musculaire est en raison directe de la conservation du mouvement volontaire, et qu'elle ne disparaît en totalité que dans le cas où la paralysie est complète et le mouvement volontaire n'existe plus.

Dans les maladies de la moelle épinière, M. Alfr. Becquerel conseille les bains de pied électriques sous l'influence desquels la presque totalité des muscles inférieurs se contractent en même temps. Quant aux paralysies nerveuses, suivant lui, on ne doit avoir recours au traitement électrique que lorsque les autres agents thérapeutiques ont échoué.

L'électricité voltaïque peut aussi servir utilement à appliquer un moxa dans les régions les plus profondes du corps, comme l'a fait le docteur Palaprat vers 1828 (41). On introduit, à cet effet, dans la partie affectée une aiguille de platine, que l'on met en communication avec l'un des pôles d'une pile à larges surfaces, tandis que l'autre est en relation au moyen d'une plaque métallique, avec une partie du corps voisine de celle où est l'aiguille. A l'instant où le circuit est fermé, l'aiguille s'échauffe jusqu'à l'anneau de cuivre et produit l'effet du moxa.

M. le docteur Middeldorpff (42) a publié un travail important sur ces cautérisations; après avoir modifié la manière de les appliquer, il résume ainsi les avantages de ce mode de traitement :

1° L'absence d'hémorragie;

2° La rapidité et l'énergie d'action;

3° La limitation exacte des effets de l'opération;

4° La possibilité de brûler et de couper des parties profondes qui sont absolument inaccessibles à l'instrument tranchant;

5° La production de bourgeons charnus de bonne nature;

6° Il évite au malade la terreur que lui cause toujours l'emploi du fer rouge.

M. J. Regnault a étudié les différents effets des cautérisations galvaniques, et en a signalé les avantages et les inconvénients.

M. le docteur Alfr. Becquerel a déduit de ses expériences que l'opérateur se trouvait entre deux écueils : ou de fondre le fil métallique, ou de ne pas le porter à la température nécessaire pour produire une vraie cautérisation. Du reste, les fils métalliques qui sont placés dans l'organisme se refroidissant par contact sont dans des conditions à exiger un courant plus fort pour être portés à la même température rouge que lorsqu'ils sont dans l'air, voir page 241 ; c'est un point auquel les praticiens doivent avoir égard.

L'électricité atmosphérique à très-forte tension, comme la foudre, ou agissant par influence ou par simple écoulement, a été invoquée comme moyen thérapeutique. Des ouvrages spéciaux ont été publiés à ce sujet. M. Boudin (43) cite des exemples de guérison par la foudre, telles que des affections rhumatismales, paralysie de membres, d'amauroses, etc. ; il décrit dans son ouvrage tous les effets physiologiques qui ont été observés jusqu'ici sur l'homme qui a été foudroyé, et les moyens médicamenteux à employer pour rappeler à la vie quand il n'y a pas de lésions organiques profondes.

On a attribué à l'action par influence dans les temps orageux le malaise et l'agitation qu'éprouve quelquefois l'homme en bonne santé ou dans un état morbide ; mais a-t-on bien fait la part de l'influence que l'on doit attribuer à une température élevée et humide, et surtout à l'effet moral, dont on ne tient pas toujours compte dans ces circonstances ?

On a invoqué encore l'influence, principalement sur les phénomènes de la respiration, de l'ozone qui est produit dans les décharges électriques, même les plus faibles ; mais on n'a encore mis en avant que de simples allégations, sans apporter de preuves convaincantes.

L'électricité atmosphérique pendant son écoulement vers la terre par l'intermédiaire de l'homme, des animaux, des arbres, des plantes et de tous les corps qui forment saillie au-dessus du sol, doit donner lieu à des effets chimiques dont on ignore l'influence dans les phénomènes de la vie. Les feuilles et les branches par lesquelles entre l'électricité positive de l'air sont les surfaces polaires négatives relativement à l'air ; les racines qui prennent l'électricité négative à la terre sont, au contraire, les surfaces polaires positives à l'égard de la terre. Ainsi les alcalis et l'hydrogène prove-

nant de l'action électro-chimique tendent donc à se porter à la périphérie des feuilles ; les acides et l'oxygène, à celle des racines. Indépendamment de ces effets, il faut avoir égard à ceux qui résultent des courants électriques, dont il a été fait mention page 174.

En terminant, nous indiquerons d'une manière générale, d'après M. le docteur Alfr. Becquerel (44), les circonstances dans lesquelles l'électricité peut être employée avec succès, lorsqu'il s'agit de rétablir, 1° la contractilité dans les muscles qui en sont privés ; 2° la sensibilité générale ou la sensibilité spéciale des organes d'un sens, abolie ou simplement diminuée, lorsqu'il est nécessaire de ramener à leur type normal la contractilité et la sensibilité exagérées ou perverties, et de produire une révulsion cutanée. Il faut avoir égard, en outre, dans l'administration de cet agent : 1° à la sensibilité nerveuse ; 2° à l'idiosyncrasie électrique ; 3° aux maladies anciennes ; 4° aux maladies aiguës ou chroniques ; 5° à la persistance d'une lésion organiques ayant déterminé le phénomène morbide contre lequel on emploie l'électricité.

Les recherches de MM. Marianini, Nobili, Matteucci, Longet, Dubois-Reymond, etc., ont beaucoup ajouté à nos connaissances touchant l'action physiologique de l'électricité. Quant à l'action thérapeutique de l'électricité, on a déjà obtenu de bons résultats dans l'emploi des courants interrompus pour stimuler une organe qui est dans un état d'inertie, et dans celui des fils chauffés au rouge pour opérer des cautérisations ou des sections.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE XI.

(1) Van Marum, *Expériences faites avec la grande machine du Musée de Teyler*, t. III, p. 68.

(2) *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. V, p. 784.

(3) Davy, *Chimie agricole*, traduction française.

(4) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. LII, p. 240.

(5) *Histoire de l'Académie des sciences pour* 1700.

(6) Van Marum, t. III, p. 50.

(7) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. XL, p. 225.

(8) Sue, *Histoire du galvanisme*, t. I, p. 22, 35, 144, 213.

(9) *Journal de physique*, pluviôse an IX. — *Annales de chimie*, 1re série, t. XXXVIII, p. 42.

(10) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. XL, p. 225.

(11) *Idem*, t. XLIV, p. 60.

(12) Matteucci, *Traité des phénomènes électro-physiologiques*, p. 198

(13) Matteucci, *Traité des phénomènes électro-physiologiques*, p. 202.

(14) *Journal de physique*, 1792.

(15) Matteucci, ouvrage cité p. 206.

(15') *Idem*, p. 237.

(16) *Journal de physique*, 1792. — *Lettres sur l'électricité*, adressées à de la Mettrie et Desgenettes.

(17) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. LXVI, p. 387.

(18) *Idem*, t. XL, p. 225.

(19) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. LXVI, p. 21.

(20) Longet, *Traité de physiologie*, t. II, p. 66. — *Traité de physiologie* de Matteucci, p. 222.

(21) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XIX, p. 502.

(22) Longet, *Traité de physiologie*, t. II, p. 66.

(23) *Idem*, t. II, p. 72.

(24) Aldini, *Essai théorique et expér. sur le galvan.*, p. 108 (1804).

(25) *Philos. transact.*, 1800, p. 427. — Aldini, ouvrage cité p. 107.

(26) Longet, *Traité de physiologie*, t. II, p. 74.

(27) De Humboldt, *Expériences sur le galvanisme*, traduit par Jadelot, p. 99.

(28) Jalabert, *Expériences sur l'électricité*, Genève (1748).

(29) Bertholon, *Électricité du corps humain* (1786).

(30) Mauduil, *Mémoire sur différentes manières d'administrer l'élect.* (1781).

(31) Sigaud-Lafond, *Électricité médicale.*

(32) Aldini, Ouvrage cité plus haut.

(33) Becquerel, *Traité de physique*, t. II, p. 639.

(34) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. LIV, p. 306.

(35) *Idem*, *id.*, p. 60.

(36) *Biblioth. univ. de Genève*, t. XV, p. 184. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. XLVII, p. 129.

(37) *Dictionnaire de médecine et de chirurgie pratique*, *au mot* Électricité.

(38) Masson, *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. LXVI, p. 27.

(39) Duchenne, *Électrisation localisée*. Paris, 1855. — Mémoires dans les *Archives de médecine.*

(40) Alfred Becquerel, *Application de l'électr. à la thérapeutique*. Paris, 1857.

(41) *Du galvanisme appliqué à la médecine*, par Labaume, traduit par Palaprat, p. 57, 1828.

(42) *Archives de médecine*, 1855.

(43) Boudin, *Histoire physique et médicale de la foudre et de ses effets*

(44) Alfred Becquerel, *Applic. de l'électr. à la thérap.*, p. 124.

CHAPITRE XII.

Applications diverses de l'électricité aux arts.

---

§ I. *Traitement électro-chimique des minerais d'argent, de plomb et de cuivre.*

La première communication relative au traitement électro-chimique des minerais métalliques fut faite par M. Becquerel, à l'Académie des sciences, en 1836 (1); la seconde eut lieu sous forme de réflexions dans deux discours lus dans les séances publiques des cinq Académies, les 2 mai 1837 et 1838. Dans le discours de 1838 on y trouve, entre autres ce passage : « On commence, comme dans l'a« malgamation, par faire subir au minerai une préparation préalable, « en employant divers procédés qui dépendent de sa nature et des « ressources que présente le pays en produits chimiques ; puis on « fait passer un courant électrique dans la masse minérale convena« blement disposée et humectée ; ce courant s'empare de l'argent « qu'il transporte sur des corps non oxydables, où on le recueille à « l'*état de poudre, de cristaux* ou *de lamelles,* suivant l'intensité de « l'action décomposante, etc. »

M. Delarive (2), dans le discours préliminaire qui se trouve en tête du premier volume des *Archives de l'électricité,* s'exprime ainsi, en parlant du traitement électro-chimique des métaux, de la dorure et de la galvanoplastie, dont il sera question plus loin :

« M. Becquerel est le premier physicien qui ait eu l'idée de ce « genre d'application dans les travaux qu'il a faits sur le traitement « électro-chimique des minerais, pour en extraire essentiellement « l'argent. Il est aussi l'auteur du principe qui a fourni à M. Jacobi « le moyen de créer l'art de la galvanoplastie, et à moi-même de

« pouvoir dorer les métaux sans l'emploi du mercure ; l'idée d'em-
« ployer un diaphragme en vessie ou en baudruche pour séparer
« deux dissolutions, tout en permettant qu'elles soient dans le cir-
« cuit voltaïque, appartient en entier à M. Becquerel. C'est encore
« M. Becquerel qui avait le premier appliqué cette idée à la pro-
« duction d'un courant de forme constante, longtemps avant que
« les physiciens anglais construisissent leurs piles fondées sur ce
« principe. Ainsi le seul point commun qu'il y avait entre l'appli-
« cation que M. Jacobi a faite de la décomposition d'une solution de
« sulfate de cuivre à la reproduction des objets en relief, particu-
« lièrement des médailles, et celle que j'ai moi-même faite de la
« décomposition d'une solution d'or au dorage des métaux, ce seul
« point commun, dis-je, appartient tout entier à M. Becquerel, et
« non à M. Jacobi, pas plus qu'à moi, etc. »

Le traitement électro-chimique (3) des minerais d'argent, de plomb et de cuivre, repose sur la propriété que possèdent le chlorure d'argent et le sulfate de plomb de se dissoudre dans une solution saturée de sel marin, et le sulfate de cuivre dans l'eau. M. Becquerel a commencé par indiquer les moyens les plus économiques pour chlorurer l'argent et sulfater le plomb dans leurs minerais respectifs. Les appareils employés pour opérer la décomposition des trois sels métalliques sont les mêmes que ceux dont il avait fait usage pour la reproduction des substances minérales ; ce sont des appareils simples, qui réunis peuvent former des piles, et n'en diffèrent qu'en ce que leurs dimensions sont en rapport avec les quantités de minerai à traiter. L'élément électro-positif est le zinc, l'élément électro-négatif le cuivre ou le fer-blanc, et le diaphragme un cylindre en toile à voile ; ce genre de diaphragme avait déjà été employé, dès 1836, pour ces expériences.

Les expériences ont été faites dans une usine d'essai où l'on a traité plus de 10,000 kilogr. de minerais venus du Mexique, du Pérou, de la Colombie, de l'Altaï, etc.; l'exposé du traitement électro-chimique, dans l'ouvrage cité précédemment (3), est divisé en deux parties : la première comprend les principes généraux dont la connaissance est indispensable pour l'intelligence du procédé ; la seconde traite d'abord des divers modes de traitement des minerais d'argent par la voie humide, en y comprenant l'amalgamation à froid et l'amalgamation à chaud, auxquelles on peut attribuer une origine électro-chimique. Viennent ensuite les différentes méthodes électro-chimiques à l'aide desquelles on retire à l'état métallique

l'argent, le cuivre et le plomb de leurs minerais respectifs, méthodes qui permettent aussi de séparer l'argent du plomb de la galène, sans avoir recours à l'amalgamation, ou du moins, si celle-ci est nécessaire, elle n'a plus lieu que sur un plomb d'œuvre très-riche, et on l'évite même en employant l'amalgamation au *cazo*, même pour la galène, que l'on transforme en totalité en sulfate de plomb. Le traitement électro-chimique ne peut être effectué qu'à deux conditions : la première, que le sel ordinaire sera à bas prix ; la seconde, qu'il y aura une quantité suffisante de combustible pour opérer le grillage des minerais.

M. Duport Saint-Clair (4), habile affineur, qui a fait au Mexique des essais du procédé électro-chimique, en parle dans les termes suivants : « Quelles seraient les conséquences du manque presque « complet de mercure, si, par un de ces événements peu probables, « sans doute, mais cependant possibles, la mine d'Almaden venait « à cesser de fournir du cinabre, soit par des éboulements, soit par « une trop grande abondance des eaux?... Il s'ensuivrait une hausse « de prix telle, qu'elle équivaudrait en quelque sorte à une disette « absolue. Que deviendrait alors l'extraction de l'argent au Mexi- « que? Il y a quelques années, cette question eût été fort embar- « rassante à résoudre, car on ne connaissait aucun autre moyen « d'extraire l'argent du minerai que la fonte ou l'amalgamation. Les « recherches auxquelles s'est livré M. Becquerel, avec toute la per- « sévérance que demande toujours la première application de la « science à l'industrie, ont présenté un moyen tout nouveau à la « métallurgie, par l'emploi des forces électriques; initié par l'in- « venteur lui-même dans tous les détails de ce nouveau procédé, « j'ai pu me convaincre de la possibilité de son application indus- « trielle sur les minerais du Mexique, autant par des expériences « faites sur 6,000 kilogrammes de minerai des principaux districts, « que j'avais fait venir à Paris, il y a trois ans, que par celles que « j'ai répétées moi-même sur les lieux, etc. »

M. Duport Saint-Clair énumère les causes qui l'ont empêché d'appliquer le procédé au Mexique, causes qui ne tiennent pas au procédé en lui-même, mais à l'habitude que l'on a de l'amalgamation, qui est un obstacle pour toute innovation, et surtout au prix élevé du sel marin.

§ II. *Dorure, argenture et dépôt des métaux et oxydes métalliques en couches minces.*

On sait depuis longtemps qu'en plongeant dans une dissolution métallique un métal plus oxydable que celui qui est combiné, ce dernier est ramené à l'état métallique par le premier qui se substitue en son lieu et place; le dépôt métallique est tantôt pulvérulent, tantôt plus ou moins adhérent à la surface du métal précipitant; tantôt enfin il est fortement adhérent, comme dans l'étamage du fer, dans celui des épingles et dans le zincage du fer. Les effets produits dans ces différents cas sont dus aux actions combinées des affinités, de l'électricité et de l'agrégation; ce n'était là que le prélude de la dorure électro-chimique, de l'application des métaux sur des métaux et de la galvanoplastie.

L'art d'appliquer un métal, et principalement l'or et l'argent, sur un autre métal, à l'aide des forces électriques, ne date que de peu d'années, et les avantages qu'il présente l'ont fait substituer dans bien des cas aux autres procédés.

Brugnatelli (5) paraît être le premier qui ait observé que l'on pouvait dorer au moyen de la pile et d'une dissolution alcaline d'or; effectivement, dans une lettre qu'il adressait à Van Mons en 1805, on trouve ce passage : «..... J'ai dernièrement doré, d'une manière par-« faite, deux grandes médailles d'argent en les faisant communi-« quer à l'aide d'un fil d'acier avec le pôle négatif d'une pile « voltaïque, et en les tenant l'un après l'autre plongés dans de « l'ammoniure d'or nouvellement fait et bien saturé. » Bien que Brugnatelli ne dise pas que le circuit était fermé, cependant on ne saurait douter qu'il ne le fût, puisque la dorure n'aurait pu s'effectuer sans cela. Cependant ces essais furent en quelque sorte oubliés, et il y avait loin de cette expérience à l'application de l'action décomposante de l'électricité à la dorure des différents métaux.

M. Delarive (6), qui a si puissamment contribué aux progrès de l'électricité, est le premier qui, sans aucun doute, ait eu la pensée d'introduire dans l'industrie l'application de l'or sur les métaux au moyen de l'électricité, et qui l'ait réalisée en 1840, en faisant usage des appareils simples dont on vient de parler, page 268. Il faisait usage d'une dissolution de chlorure d'or dans l'eau salée très-étendue : l'or déposé sur l'objet qui formait l'électrode négative avait de l'adhérence, mais cette adhérence était faible, et une partie de la

dissolution était réduite par le zinc. Il restait à découvrir une dissolution d'or qui ne présentât pas ces inconvénients; mais, en attendant, l'emploi industriel de la dorure par la pile et sa réalisation appartiennent à M. Delarive; les perfectionnements sont venus ensuite.

L'art de la dorure en était là lorsque M. Elkington découvrit un procédé de dorure sur cuivre par immersion, qui a donné une grande extension non-seulement à la dorure, mais encore à l'argenture et à l'application de différents métaux sur d'autres métaux. Pour la dorure, au lieu d'une dissolution éthérée ou aqueuse de chlorure d'or, il a fait usage d'une dissolution alcaline d'or, qui a été le point de départ de la dorure électro-chimique pratique. M. Elkington (7), qui vit sur-le-champ l'importance de ces dissolutions, prit des brevets les 22 mars 1839 et 29 septembre 1840, pour s'en réserver l'emploi exclusif avec les appareils électro-chimiques simples.

M. de Ruolz (8) est venu ensuite, et se fit breveter plusieurs mois après; mais, au lieu de l'appareil simple, il fit usage d'une pile composée de plusieurs éléments. On lui doit en outre plusieurs perfectionnements : le choix de différentes dissolutions alcalisées, et une extension à l'argenture et à l'application d'autres métaux. Parmi les dissolutions qu'il a employées, nous citerons le cyanure d'or dissous dans le cyanure simple de potassium; le cyanure d'or dans les cyano-ferrures jaune et rouge, etc. L'emploi de la pile et celui de l'électrode soluble ont permis de supprimer le diaphragme.

De nombreux perfectionnements ont été introduits depuis dans la dorure et l'argenture électro-chimique, entre autres par M. Christofle, qui a donné une grande extension aux applications. On a étendu aussi les principes précédents aux dépôts de l'étain et du platine en faisant usage d'autres dissolutions; nous citerons notamment à cet égard M. Roseleur (8[1]).

M. Becquerel (9), après avoir montré comment on pouvait obtenir le cobalt et le nickel de leurs dissolutions en traitant celles-ci à la température de l'ébullition, avec du zinc en parties très-divisées, est parti de là pour faire adhérer sur différents métaux le nickel, le cobalt, le platine; le palladium, etc. On fait usage pour le platinage d'une dissolution très-étendue de double chlorure de potassium et de platine; on porte la température à 60 ou 70°; on plonge dedans les objets en cuivre parfaitement décapés. En partant des mêmes principes il a décrit en même temps un procédé d'argenture.

Dépôts des oxydes métalliques en couches minces. Nobili (10) est le premier qui ait déposé ou produit sur des plaques de différents

métaux en communication, tantôt avec le pôle positif d'une pile, tantôt avec le pôle négatif, des couches formant des anneaux colorés rappelant les apparences colorées obtenues par Prietsley, en opérant la décharge de batteries électriques sur des plaques de métal. M. Varington (11), en répétant les expériences de Nobili, montra que les couleurs des anneaux colorés produits étaient dues à des couches minces de peroxyde de plomb.

M. Becquerel (12) est parvenu à déposer sur les métaux des oxydes tels que les peroxydes de plomb et de fer, surtout ce dernier qui est très-fixe, de manière à produire des teintes colorées uniformes; il s'est servi à cet effet de la dissolution de protoxyde de plomb dans la potasse et de celle de protoxyde de fer dans l'ammoniaque. Avec la première et en employant un couple ou deux à acide nitrique ou à sulfate de cuivre, on recouvre en peu d'instants d'une couche de peroxyde de plomb une lame de fer ou de cuivre plongeant dans la dissolution et en communication avec le pôle positif, le circuit étant complété avec un fil de platine. La formation du peroxyde est due à la combinaison du protoxyde dissous avec l'oxygène provenant de la décomposition de l'eau et qui se porte au pôle positif.

Avec la dissolution ammoniacale de protoxyde de fer on recouvre une lame de ce métal rendue positive d'une couche de peroxyde adhérente, de couleur brun-rouge, qui prend le poli avec le rouge d'Angleterre. En employant la dissolution plombique et ne déposant que des couches excessivement minces de peroxyde sur les métaux, on fait naître des teintes aussi variées, aussi riches et aussi éclatantes que celles des ailes des papillons des régions tropicales. Ces teintes acquièrent d'autant plus d'éclat que les surfaces ont été frottées davantage avec la peau et le rouge d'Angleterre; cet effet est dû au bruni qui détermine la réflexion d'une plus grande quantité de rayons lumineux. Les couleurs sont celles des anneaux colorés des lames minces, puisque l'ordre de leur succession est le même. On obtient les plus belles teintes bleues que l'on puisse imaginer en platinant préalablement au trempé les pièces de cuivre destinées à être colorées. Les pièces colorées peuvent servir dans la bijouterie, tandis que celles qui sont recouvertes de peroxyde de fer peuvent être utilisées dans les arts.

M. E. Becquerel (13) a montré que, d'après l'indice de réfraction du peroxyde de plomb qui devait être intermédiaire entre celui de l'air et celui du métal, les teintes des lames minces correspondaient aux anneaux colorés transmis, et non pas aux anneaux réfléchis.

§ III. *Dépôts des métaux en couche épaisse ou galvanoplastie.*

La galvanoplastie est l'art au moyen duquel on dépose dans un moule creux ou en relief rendu conducteur, et formant l'électrode négative d'un appareil simple ou d'une pile composée de plusieurs couples voltaïques à courant constant, un métal dont les parties s'agrégent ensemble et prennent l'empreinte de la surface du moule. Cet art a pris naissance presque simultanément en Russie et en Angleterre; suivons l'ordre des publications des travaux, afin de rendre à chacun ce qui lui appartient dans cette découverte.

M. Fuss annonça à l'Académie de Saint-Pétersbourg, dans la séance du 9 octobre 1838 (21 octobre de notre style), que M. le professeur Jacobi venait de faire une découverte qui présageait d'importants résultats pour l'art chalcographique.

Dans l'*Athenæum* (14) (mai 1839), il est dit positivement que M. Jacobi avait trouvé un procédé galvanique pour convertir en un relief les lignes les plus délicates gravées sur une planche de cuivre.

Dans une lettre de M. Jacobi (15), adressée à M. Faraday, sous la date du 21 juin 1839 (2 juillet de notre style), se trouvent les passages suivants, qui sont significatifs : « Il y a longtemps qu'en « poursuivant mes recherches sur l'électro-magnétisme, je fus « conduit, par un hasard heureux, à une découverte importante : « c'est que l'on pouvait, à l'aide d'un courant voltaïque, obtenir « des épreuves en relief de planches de cuivre gravées, et qu'une « contre-épreuve de ces mêmes épreuves en relief pouvait égale- « ment être obtenue à l'aide du même procédé. Nous possédons « donc un moyen de multiplier à l'infini les exemplaires d'une « planche de cuivre gravée.

« Ce procédé voltaïque reproduit les lignes les plus délicates, « celles-là même qui ne sont visibles qu'au microscope. La copie et « l'original sont tellement identiques, que l'examen le plus minutieux « ne peut faire connaître la plus légère différence. » L'auteur décrit ainsi l'appareil : « C'est un simple couple voltaïque à cloison ; la « plaque de cuivre dont on fait ordinairement usage est remplacée « par la planche gravée dans la solution du sulfate de cuivre..... »

Après avoir indiqué les moyens à l'aide desquels on règle la force du courant, M. Jacobi ajoute : « Quant à la solution du sul- « fate de cuivre, il est de la plus haute importance, pour le succès

« de l'opération, qu'elle demeure parfaitement saturée. L'action ne « doit pas être trop rapide : 50 à 60 grains de cuivre doivent être « réduits sur chaque pouce de carré de surface toutes les vingt- « quatre heures (environ 40 grammes par décimètre carré). Il doit « être bien entendu qu'il nous est loisible aussi de réduire le sulfate « de cuivre en faisant passer à travers la solution de ce sel, à l'aide « d'électrodes en cuivre, le courant engendré par l'action d'un seul « couple voltaïque. Dans ce cas, on pourra se dispenser de sup- « pléer à la concentration de la solution, car l'anode s'oxydera à « mesure que le cathode se couvrira de cuivre réduit. En théorie, « on serait porté à croire que la quantité de cuivre qui est oxydée à « l'anode doit être exactement égale à la quantité de cuivre qui est « réduite à la cathode; mais, en fait, j'ai toujours trouvé entre ces « deux quantités une différence plus ou moins notable. L'anode « perd toujours plus que ne gagne la cathode. Cette différence pa- « raît être à peu près constante; au moins n'augmente-t-elle pas si « l'on prolonge l'expérience pendant un certain temps. »

Après avoir indiqué les effets que le courant électrique produit dans des dissolutions saturées de sulfate de cuivre et dans des dissolutions étendues, ainsi que l'état d'agrégation du cuivre dans ces circonstances, M. Jacobi continue ainsi :

« Quant à l'importance chimique de ces copies galvaniques, je « dois vous faire remarquer que nous pouvons employer comme ca- « thode (pôle négatif) non-seulement tous les métaux plus négatifs « que le cuivre, mais encore certains métaux positifs, ainsi que leurs « alliages (il faut excepter le laiton), bien que ces métaux et ces al- « liages, pris isolément, réduisent les sels de cuivre. Ainsi, par « exemple, on peut obtenir des clichés de cuivre sur métal d'im- « primerie dont on peut multiplier le nombre à volonté.

« J'aurai bientôt le plaisir de vous envoyer un bas-relief en cuivre « dont l'original est formé d'une substance plastique qui se prête « parfaitement à tous les caprices et à tous les besoins de l'art. Le « procédé que je viens de décrire reproduit toutes les touches déli- « cates qui font la principale beauté d'une pareille œuvre, et qui « sont toujours sacrifiées dans les procédés ordinaires de la fonte, « procédés qui ne sauraient jamais les reproduire dans toute leur « pureté. L'art a certes des grâces à rendre à la science qui lui a ou- « vert cette route nouvelle. »

Immédiatement après la publication de la découverte de M. Jacobi, M. Spencer annonça qu'il était parvenu aussi à obtenir de-

puis un certain temps des médailles en cuivre, en se servant de l'appareil simple à courant constant. Aucune publication officielle à ce sujet n'avait eu lieu de la part de M. Spencer avant celle de M. Jacobi; quoi qu'il en soit, voici comment le hasard conduisit M. Spencer à faire l'expérience suivante :

Une plaque de cuivre ayant été recouverte à chaud d'une couche de vernis, composée de cire jaune, de résine et d'ocre rouge, on traça avec une pointe métallique, dans ce vernis, des lettres mettant à nu le cuivre comme dans la gravure à l'eau forte, on plongea cette plaque ainsi préparée dans un vase rempli à moitié d'une solution saturée de sulfate de cuivre, ainsi que le verre d'un bec à gaz, dont le bout inférieur était fermé avec un tampon de plâtre et rempli aux deux tiers d'une solution étendue de sulfate de soude où se trouvait un cylindre de zinc qui fut mis en communication avec la lame de cuivre placée parallèlement à la face inférieure du cylindre. Dès l'instant que le circuit fut fermé, les sillons tracés dans le vernis furent remplis par le cuivre et produisirent des caractères en relief.

M. Spencer (16) eut aussitôt l'idée de faire servir ces caractères à l'impression typographique; dès 1838, il prépara ainsi une plaque de cuivre avec laquelle il obtint des épreuves qui circulèrent dans le public. Il chercha ensuite les conditions à remplir pour que le cuivre pût résister à l'action de la presse, et ne tarda pas à voir que la densité de la dissolution du sulfate de cuivre, l'épaisseur et la perméabilité du diaphragme, étaient les éléments à prendre en considération; avec une solution saturée de sulfate de cuivre, le cuivre précipité était pur, et renfermait d'autant plus de protoxyde que la densité était moindre; au delà d'une certaine limite on n'obtenait plus que du protoxyde, la solution étant toujours saturée. Quand le diaphragme était mince et grossier, le cuivre se précipitait rapidement et était granuleux et friable; en augmentant l'épaisseur, ou la texture devenant plus serrée, le cuivre se déposait lentement, devenait plus dur, plus homogène, et acquérait de plus en plus les qualités du cuivre pur obtenu par fusion, que l'on doit rechercher en galvanoplastie.

M. Spencer parvint à reproduire en creux une médaille de cuivre avec une merveilleuse fidélité; mais souvent l'adhérence du dépôt sur le moule était telle qu'il ne pouvait séparer l'un de l'autre; il parvint à éviter cette adhérence en lavant la surface du moule avec une faible solution alcaline. M. Spencer ne s'était pas borné à mou-

ler en creux des monnaies, des médailles ; il se servait encore des moules pour obtenir des contre-épreuves, qui étaient les *fac-simile* de toutes ces pièces. De semblables pièces circulaient, à ce qu'il paraît, à Liverpool dans les premiers mois de 1838.

Pour étendre les applications de la galvanoplastie, M. Spencer mit à profit la méthode du timbre sec et celle du moulage en plâtre : La première consiste à prendre des empreintes avec des lames de plomb soumises à une forte pression, et à faire servir ces lames comme d'électrodes négatives ; la seconde consiste à prendre avec du plâtre les empreintes des mêmes objets en creux, en faisant adhérer à la surface une poudre métallique extrêmement fine, ou bien imbibant le plâtre d'une solution de nitrate d'argent que l'on décompose en l'exposant à la vapeur de l'alcool ou de l'éther phosphoré. Une couche excessivement mince de métal ou de plombagine déposée sur le plâtre suffit pour rendre la surface conductrice, et permet par conséquent la précipitation du cuivre.

Bien que les expériences de M. Spencer ne paraissent pas avoir l'antériorité de date sur celles de M. Jacobi sous le rapport de la publication, rien ne prouve cependant qu'il ait eu connaissance de celles de M. Jacobi : il est donc probable qu'ils ont été conduits, chacun de son côté, à la découverte de la galvanoplastie. Ils ont reconnu d'abord ce fait capital, qu'il fallait toujours opérer avec une solution saturée de sulfate de cuivre, pour que le dépôt réunît toutes les conditions requises d'homogénéité et de solidité ; mais l'un et l'autre ont fait des observations qui tendent à prouver qu'ils ont étudié chacun séparément la question ; ainsi M. Spencer a non-seulement indiqué les applications de la galvanoplastie à la reproduction des médailles, des planches gravées, etc., mais il a encore décrit tous les moyens à l'aide desquels on opère cette reproduction ; il a analyse aussi avec soin les diverses causes qui influent sur les qualités du dépôt de cuivre. Les observations de M. Jacobi sont, à la vérité, moins précises, mais aussi on lui doit l'emploi de plusieurs couples voltaïques, celui de l'électrode positive de même nature que le métal qui est en dissolution, afin d'avoir une dissolution toujours au même degré de concentration, emploi qui rend pratiques la dorure électro-chimique et la galvanoplastie.

Depuis cette époque la galvanoplastie, comme les dépôts en couches minces, a rendu de grands services à l'industrie. et l'emploi de la gutta-percha comme matière plastique a contribué puissamment à son extension, surtout pour l'orfèvrerie, la statuaire et

l'ornementation. La typographie et la reproduction des types gravés, lorsqu'elles ne nécessitent pas l'emploi d'empreintes prises sur du plomb par le procédé du timbre sec, comme dans la reproduction des types des timbres-poste, des billets de banque, etc. (16'), a également utilisé cette substance que sa plasticité et une certaine flexibilité rendent si apte à servir de moule pour les dépôts galvaniques. La gutta-percha a donc été un puissant auxiliaire pour arriver au point où l'on est parvenu aujourd'hui; toutefois comme les perfectionnements apportés ne sont plus du domaine de la science, mais rentrent dans celui de l'industrie, nous nous abstenons d'entrer dans aucuns détails à ce sujet et de citer les noms des personnes qui ont concouru à porter cet art au degré de perfection où il est parvenu.

Le cuivre et l'argent sont presque les seuls métaux dont on s'est borné jusqu'ici à étudier les dépôts en couches épaisses et malléables ; quant aux dépôts des alliages, on ne les a obtenus qu'en couches minces capables de donner une teinte spéciale aux surfaces métalliques.

§ IV. *Télégraphie électrique.*

L'idée de transmettre des signaux à distance par l'électricité a dû se présenter aux observateurs depuis l'époque où l'étude de cet agent a commencé à prendre de l'extension; on a vu, en effet, dans le chapitre premier, que, vers le milieu du siècle dernier, les découvertes relatives aux principales propriétés de l'électricité statique, savoir, la conductibilité, celle des deux électricités, des condensateurs, se sont succédé rapidement. Aussi est-ce à cette époque que l'on fait remonter les documents où il est question de cette belle application de la physique, qui date à peine de vingt ans, et dont les conséquences sont immenses pour les relations à établir entre les différents pays. Ce document est une lettre écrite par un Écossais (17) dont le nom n'est désigné que par les initiales C. M., et datée de Renfrew, le 1er février 1753; dans cette lettre il dit que, si l'on suppose une série de fils conducteurs parallèles placés à un pouce de distance l'un de l'autre, en aussi grand nombre qu'il y a de lettres dans l'alphabet; en admettant que les fils supportés et isolés par des potaux aillent d'un lieu à un autre, si dans le premier lieu on fait toucher successivement les fils à la garniture intérieure d'une batterie électrique, l'attraction qui en résultera sur de petites balles placées aux extrémités des fils donnera à l'observateur placé dans

le second lieu l'indication du mot ou de la lettre que le premier observateur aura voulu transmettre.

Cette idée ne fut pas suivie, et il faut aller jusqu'en 1774 (18) pour retrouver une tentative faite d'après une disposition analogue et qui est due à un Français, nommé Lesage, établi à Genève. Lomond (19), en 1787, employa un seul fil, et, d'après le plus ou moins d'écartement d'un pendule, chercha à transmettre des signes différents. Reiser en 1794, Cavallo en 1795, Salva et l'Infant don Antonio en 1796, Bétancourt vers la fin du siècle dernier, et enfin Ronalds en 1823 (19'), essayèrent d'utiliser les effets d'attraction ou les actions chimiques dues à l'électricité statique, pour atteindre le même but. Ce dernier imagina de faire tourner un cadran portant des lettres qui venaient se placer successivement devant une petite ouverture; c'est la première fois que cette idée s'est présentée comme moyen télégraphique.

La découverte de la pile par Volta, au commencement du siècle, en montrant que l'électricité sous forme de courant n'offre pas la même tension que les sources d'électricité statique, a permis d'imaginer de nouvelles formes pour les appareils à l'aide desquels on se proposait de transmettre des signaux ; c'est ainsi que Coxe en 1810, et Sommering en 1811, proposèrent de se servir des propriétés électro-chimiques de l'électricité voltaïque ; ce dernier construisit même à Munich un appareil dans lequel vingt-quatre fils, correspondant aux lettres de l'alphabet, étaient en relation avec autant d'appareils à décomposer l'eau, lesquels servaient à indiquer, par l'effet produit sur le liquide, le signe que l'on voulait transmettre.

Mais, aussitôt après la découverte d'Œrsted, en 1820, Ampère, dont les travaux ont créé en quelques mois l'électro-magnétisme (voir pages 72 et suivantes), indiqua, la même année, l'emploi que l'on pourrait faire de l'effet produit par un courant électrique sur l'aiguille aimantée comme moyen télégraphique. On trouve, en effet, dans le mémoire qui résume ses premiers travaux, les passages suivants (20) : il y a « possibilité de faire mouvoir l'aiguille « aimantée à une grande distance de la pile, au moyen d'un « conducteur très-long, dont le milieu se recourbe dans la direc- « tion du méridien magnétique au-dessus ou au-dessous de l'ai- « guille. Cette expérience m'a été indiquée par le savant illustre « (Laplace) auquel les sciences physico-mathématiques doivent « surtout les grands progrès qu'elles ont faits de nos jours; elle a « pleinement réussi. »

Plus loin il dit : « On pourrait, au moyen d'autant de fils conduc-« teurs et d'aiguilles aimantées qu'il y a de lettres, et en plaçant « chaque lettre sur une aiguille différente, établir à l'aide d'une « pile placée loin de ces aiguilles, et qu'on ferait communiquer al-« ternativement par ses deux extrémités à celles de chaque conduc-« teur, former une sorte de télégraphe propre à écrire tous les dé-« tails qu'on voudrait transmettre, à travers quelques obstacles que « ce soit, à la personne chargée d'observer les lettres placées sur « les aiguilles, en établissant sur la pile un clavier dont les touches « porteraient les mêmes lettres et établiraient la communication « par leur abaissement ; ce moyen de correspondance pourrait avoir « lieu avec assez de facilité, et n'exigerait que le temps nécessaire « pour toucher d'un côté et lire de l'autre chaque lettre. » Arago fit observer à Ampère que Sommering avait déjà proposé d'employer l'électricité comme agent télégraphique, mais en se servant de la décomposition électro-chimique de l'eau. Il n'en est pas moins vrai que si, à cette époque, on eût suivi les indications d'Ampère, on fût arrivé vingt ans plus tôt à la télégraphie électrique.

Sans parler des tentatives faites depuis cette époque jusqu'en 1834, nous dirons qu'alors MM. Gauss et Weber (21), qui étudiaient le magnétisme terrestre à l'aide des magnétomètres (voir page 120), se servirent de la propriété que possède un courant électrique d'agir sur un barreau aimanté pour mettre en communication le cabinet de physique avec l'observatoire de Gœttingue ; dès lors on put prévoir que ce mode de correspondre à distance pourrait être substitué au télégraphe aérien inventé par les frères Chappe, établi pour la première fois en France, en 1794, de Paris à Lille, et adopté partout depuis cette époque.

M. Steinheil, à Munich (22), en répétant les expériences de MM. Gauss et Weber, s'occupa de ce sujet et construisit un télégraphe à aiguille qui fonctionna en juillet 1837. Ce télégraphe était formé d'un seul circuit agissant sur deux aiguilles aimantées, et il n'y avait que deux sortes de signes possibles par le passage d'un courant électrique dans un sens ou dans l'autre. M. Steinheil employa, en même temps que les déviations de l'aiguille, le choc qu'elles pouvaient faire sur des timbres, et les traces que des plumes mues par elles pouvaient faire sur un papier ; en outre, il fit usage de courants par induction, et dit qu'il pouvait réduire à un seul fil le circuit servant à faire communiquer les deux stations en rapport, la erre pouvant faire fonction d'un des conducteurs. Ainsi M. Stein-

heil a touché dès l'origine à plusieurs des points très-importants de la télégraphie électrique, savoir : l'emploi d'un seul fil, et celui des courants par induction à la place de courants provenant d'une pile.

La même année, M. Wheatstone, à Londres, s'occupait de l'application de la télégraphie électrique, puisqu'en mars 1837 (23), un journal avait parlé de ses expériences; en juin il demandait, de concert avec M. Cooke, une patente qui leur était accordée le 12 décembre, et dans l'intervalle, en juillet, un instrument était installé, pour les essais, sur le chemin de fer de Londres à Birmingham. Ce premier appareil était composé de cinq multiplicateurs à aiguilles verticales, et exigeait cinq fils conducteurs, et, par les directions diverses des aiguilles aimantées, indiquait les différentes lettres de l'alphabet.

D'après les dates que nous avons citées, il paraît évident que les savants que nous avons nommés ont travaillé séparément à la question de la télégraphie électrique; les expériences de MM. Gauss et Weber, et celles de M. Steinheil (24), ont la priorité sur celles de M. Wheatstone ; néanmoins les noms de MM. Steinheil et Wheatstone sont attachés à cette grande application de la physique, et, s'ils n'ont pas imaginé les premiers de se servir de l'electricité comme agent télégraphique, ils ont construit les premiers appareils qui aient pu prouver que cette application ne devait pas se borner à de simples expériences de curiosité. Cependant il faut remarquer que l'appareil de M. Steinheil était plus simple, puisqu'il n'exigeait qu'un circuit, et doit être considéré comme le type des télégraphes à aiguilles, à sonneries et de ceux écrivants qui ont été proposés et préférés depuis. D'un autre côté, M. Wheatstone, dans le système qu'il employait, indiquait une sonnerie d'alarme mue par un électro-aimant temporaire, qui est le premier emploi d'un électro-aimant pour transmettre les signaux. On peut considérer cet appareil comme offrant la première indication des télégraphes utilisant un mouvement d'horlogerie dont la marche est réglée par un électro-aimant temporaire parcouru par l'électricité.

M. E. Davy construisit en 1839 un télégraphe fondé sur ce dernier principe, et dans lequel un système de rouages entraînait un papier sur lequel les signaux formés par la décomposition électro-chimique de l'iodure de potassium étaient enregistrés par des lignes plus ou moins espacées et par la production de l'iodure d'amidon.

M. Morse (25), en septembre 1837, revendiqua l'invention de la télégraphie électrique en citant des lettres de personnes auxquelles il avait communiqué ses projets de télégraphie électrique en 1832.

Mais, bien qu'il ait pu travailler à résoudre cette question, il est évident que la première publication qu'il ait faite est postérieure aux publications de M. Steinheil et à celles de MM. Wheatstone et Cooke, bien que son télégraphe diffère, sous tous les rapports, des précédents. L'appareil de M. Morse n'exige qu'un seul circuit en rapport avec un électro-aimant, qui peut agir sur une armature quand le courant électrique le traverse. Cette armature est en relation avec une plume ou un style qui presse contre une bande de papier quand l'électro-aimant agit ; cette bande de papier est entraînée par un mouvement d'horlogerie, et quand, à l'aide d'un manipulateur simple ou d'une clef qui permet d'interrompre ou d'établir le courant électrique à l'une des stations, on fait fonctionner l'appareil, des traces linéaires ont lieu sur la bande de papier qui se déroule à la seconde station. Si l'on établit au moyen de la pile une décharge électrique pendant un temps très-court ou pendant un temps plus long, par le mouvement de la clef mue à la main, on forme des points ou des lignes sur la bande de papier, et la succession des lignes et des points donne les signaux conventionnels nécessaires à la transmission télégraphique.

Cet appareil, perfectionné depuis par M. Morse lui-même, surtout au moyen d'un style qui trace en relief les points et les lignes, est aujourd'hui généralement employé dans tous les pays, car il n'exige qu'un seul circuit et est d'une manœuvre très-facile. C'est par ce motif que ce télégraphe, sauf pour des cas spéciaux, est préféré aujourd'hui, bien que beaucoup d'appareils et de systèmes plus ou moins compliqués, dont nous allons faire connaître quelques-uns, aient été proposés depuis.

A partir de 1837, la télégraphie électrique préoccupa les ingénieurs ; de nouveaux systèmes et des perfectionnements des premiers appareils furent mis en avant. M. Masson avait proposé d'abord un télégraphe électrique de son invention, puis, conjointement avec M. Breguet (26), en 1838, il en construisit un autre qui fonctionna au chemin de fer de la Garre. M. Vorselmann de Herre (27) voulut employer les commotions transmises à distance, c'est-à-dire un télégraphe électro-physiologique ; mais ce système n'a pas été utilisé.

En 1840 (28), M. Wheatstone décrivit un nouvel appareil, un télégraphe à cadran, dans lequel un disque mobile, à l'aide d'un mouvement d'horlogerie, venait présenter les lettres de l'alphabet devant une ouverture, et cela par le mouvement d'une armature en fer doux commandée par un électro-aimant, qui arrê-

tait ou permettait le jeu des ressorts : ainsi M. Wheatstone produisait, à l'aide de l'action électro-magnétique d'un courant, le même effet que Ronalds, en 1823, obtenait avec l'électricité statique. Ce télégraphe de M. Wheatstone n'exigeait qu'un seul circuit.

Dans les premiers temps de l'emploi des télégraphes, et pour qu'il y ait possibilité de transmettre un courant à de grandes distances, on reconnut la nécessité de n'employer le courant lancé à une station que pour faire fonctionner un premier électro-aimant destiné à mettre en action une pile locale placée à la seconde station ; cette dernière pile doit alors faire fonctionner le télégraphe. L'électro-aimant additionnel a reçu le nom de *relais*, lequel n'exige qu'une très-faible force pour fonctionner. C'est une innovation importante qui a été faite, dans les télégraphes qui ont été construits, par MM. Morse, Breguet et Wheatstone.

M. Steinheil, quelques années plus tard, a imaginé une espèce de relais, nommé *translateur*, appliqué au télégraphe Morse, et qui a pu permettre d'envoyer une dépêche d'une station à une autre en passant au travers de stations intermédiaires tout en y imprimant cette dépêche.

Afin de pouvoir bien suivre ce que nous allons indiquer, nous devons dire que chaque système télégraphique se compose essentiellement de deux paires d'appareils ; chaque paire est formée d'un *manipulateur* destiné à établir ou interrompre le courant à la station de départ, et d'un *récepteur* ou appareil qui reçoit les signes à la station d'arrivée ; le récepteur et le manipulateur sont en relation avec une pile au moyen d'un fil, la terre servant de second conducteur pour former le circuit complet.

Depuis 1837, on a modifié et simplifié les appareils, et on a cherché à tracer et à imprimer les dépêches. Le télégraphe à aiguilles de Steinheil, mais avec la forme donnée par MM. Cooke et Wheatstone et employé de préférence jusqu'ici en Angleterre, a été perfectionné et modifié ; M. Bain, en 1846, s'est occupé de cette question, et M. Gloesener, professeur à Liége, a employé les armatures aimantées et le renversement du courant. M. Wheatstone a fait fonctionner le télégraphe à cadran avec des courants induits ; M. Henley a appliqué très-simplement et d'une manière avantageuse ces mêmes courants par induction aux télégraphes à aiguilles.

M. Breguet a donné au système télégraphique à cadran une disposition qui en rend l'emploi simple et facile ; c'est ce système, en France, qui a été préféré pour le service des établissements

particuliers et des chemins de fer. D'un autre côté, M. Breguet, de concert avec M. Foy, ont disposé un double télégraphe à cadran, de façon que les aiguilles indicatrices simulent les signaux du télégraphe aérien de Chappe : c'est un des télégraphes électro-magnétiques qui transmettent le plus rapidement des signaux ; il fut adopté sur les lignes télégraphiques françaises depuis 1845 jusqu'en 1855, où le télégraphe Morse lui fut substitué. MM. Froment, Siemens, P. Garnier, Gloesener, etc., ont également présenté des systèmes télégraphiques qui fonctionnent bien.

D'après ce que nous avons dit, M. Steinheil avait employé le premier le tracé des oscillations d'aiguilles aimantées pour inscrire des lignes représentant des signaux télégraphiques ; mais M. Morse, comme on l'a vu, résolut plus simplement le problème, et, bien que son télégraphe inscrivant ait été comparé à bien des systèmes imaginés depuis une vingtaine d'années, cependant il leur a été préféré dans la transmission des dépêches des gouvernements ; en France, en Allemagne, en Italie, en Amérique, il est aujourd'hui en usage. MM. Dujardin et Froment avaient proposé des modifications à cet appareil, surtout en ce qui concerne le mode de tracé, lesquelles sont restées jusqu'ici à l'état d'expériences curieuses. Nous devons citer parmi les personnes qui ont construit et perfectionné le télégraphe Morse, MM. Siemens et Halske, en Prusse, et M. Hipp, en Suisse,

Nous avons dit plus haut que M. E. Davy avait proposé, en 1839, un télégraphe dans lequel le tracé des caractères avait lieu par l'action électro-chimique du courant agissant entre une pointe métallique et un papier ou une étoffe enduite d'iodure de potassium, de manière à amener l'iode au pôle positif et à colorer le papier ou l'étoffe. Mais, si ce télégraphe renferme le principe des télégraphes électro-chimiques, celui de M. Bain (29) fut un grand perfectionnement, et montra qu'on pouvait transmettre avec une étonnante rapidité 1,500 lettres à la minute ; le tracé avait lieu au moyen d'un style en fer ou acier, passant à frottement sur la surface d'un papier enduit d'une solution de cyano-ferrure de potassium : le courant passant entre le style et le papier, le fer, qui était le pôle positif, donnait du cyanure de fer bleu qui marquait sa trace sur le papier. Afin d'avoir une série de points et de lignes correspondant aux signes conventionnels, on était obligé de découper sur des bandes de papier, et à la manière du tracé des cartons Jacquart, des points ou des lignes, de façon que ces bandes étant inter-

posées à la station de départ entre un pinceau de fils conducteurs et une surface métallique, chaque fois qu'il y avait contact, le style placé à la station d'arrivée, entraîné par un mouvement synchronique à celui du pinceau de la première station, traçait sur le papier une série d'empreintes correspondant exactement aux signes découpés. Ces découpures étaient la plus longue préparation à faire.

Le principe du télégraphe de M. Bain a été appliqué par M. Backwell, en 1850, à la construction d'un télégraphe autographique destiné à reproduire les *fac simile* de l'écriture. En principe, le système consiste à faire mouvoir aux deux stations synchroniquement des styles, l'un étant placé à une station et servant à établir des communications électriques, l'autre se trouvant à la seconde station et servant à tracer les signes ; si on écrit des caractères sur une lame d'étain, l'encre fera fontion de corps isolant, et les caractères seront reproduits en blanc sur un fond bleuâtre à l'autre station. M. Hipp, en 1855, et surtout M. Caselli, en 1856, ont présenté des systèmes destinés à résoudre la même question. Jusqu'ici ces appareils très-curieux n'ont pas été employés d'une manière courante. Il en est de même des appareils imprimant des caractères d'imprimerie, comme ceux proposés par MM. Brett, Bain, Siemens, Bregnet, etc., bien que fort ingénieux dans leur mécanisme.

Du reste, nous n'avons fait que mentionner ces appareils très-curieux sous le point de vue mécanique ; ce qui était important pour la télégraphie électrique, c'était de montrer qu'à distance, une action magnétique ou chimique pouvait se produire simultanément avec l'action mise en œuvre au point de départ : ce but atteint, il était évident que les procédés les plus simples seraient ceux qui seraient définitivement adoptés, et c'est pour ce motif que les télégraphes à aiguilles, à cadran, et en dernier lieu celui de Morse, ont été successivement préférés à tous les systèmes proposés.

La disposition des lignes télégraphiques a exigé des recherches nombreuses qui ont conduit à des observations intéressantes : pour les transmissions sur terre, les lignes aériennes ou formées par des fils suspendus dans l'air à des poteaux à l'aide de parties isolantes en porcelaine, et adoptées en France, paraissent préférables ; l'emploi de la gutta-percha avait fait penser que des lignes souterraines donneraient de meilleurs résultats, mais les altérations qui peuvent survenir dans des parties où la surveillance ne peut avoir lieu ont fait conserver le premier mode d'isolement.

La transmission de l'électricité entre les pays séparés par la mer n'a pu s'effectuer qu'au moyen de câbles particuliers convenablement isolés et unissant les stations télégraphiques. Cette immense application, qui fait que la transmission est aussi facile à l'aide des câbles sous-marins qu'à l'aide des fils isolés tendus dans l'air, ne date que de peu d'années : M. Wheatstone, en 1840, avait proposé un moyen de résoudre la question, mais c'est sous la direction de M. Brett que le premier conducteur sous-marin, entre Douvres et Calais a été placé : ce conducteur fut bientôt rompu : néanmoins le résultat obtenu montra que le succès était possible. M. Crampton s'occupa alors de cette question comme ingénieur, et unit définitivement, en 1851, par un câble sous-marin, la France et l'Angleterre. Depuis cette époque, d'autres pays séparés par la mer ont été mis en relations télégraphiques ; nous citerons particulièrement le câble qui a uni pendant un certain temps, en 1856, Varna à Balaclava, lequel n'avait pas moins de 377 milles de longueur, soit 700 kilomètres. Le câble qui unit la France à l'Afrique en passant par la Sardaigne a également une grande étendue ; et, bien qu'il y a quelques mois, la tentative faite pour relier l'ancien et le nouveau continent ait échoué, il est probable qu'elle réussira lorsque l'on aura pris toutes les précautions nécessaires pour réaliser cette immense opération qui demande de puissants moyens mécaniques.

L'emploi des lignes télégraphiques sous-marines a permis d'étudier des phénomènes physiques qui ne s'étaient pas présentés auparavant, parce que les physiciens n'avaient pas eu à leur disposition des circuits aussi étendus et dans des conditions analogues aux fils qui servent à la télégraphie électrique ; on a vu en effet, page 198, que M. Faraday avait observé que le fil conducteur entouré de gutta-percha et plongé dans la mer ou dans la terre ne transmettait pas l'électricité dans les mêmes conditions qu'un fil métallique ordinaire : l'électricité commençait par charger le fil comme une immense bouteille de Leyde, puis exerçait son action à l'autre extrémité. En effet, dans un fil de 2,400 kilomètres, le courant mettait deux secondes à exercer son influence d'une extrémité à l'autre. Il est à remarquer que si la science a permis de réaliser les merveilles de la télégraphie électrique, d'un autre côté les appareils installés pour cet usage ont permis aux physiciens d'observer de nouveaux faits qui n'auraient pu être étudiés sans cela.

Les effets dont nous venons de parler sont tels qu'on a été obligé

de modifier les télégraphes de façon que, par le jeu du manipulateur ou de la clef, on puisse mettre le fil isolé en communication avec le sol après chaque passage du courant, afin de détruire l'effet d'induction qui aurait été produit sans cela. Le renversement du courant à chaque passage, comme dans les télégraphes de MM. Varley et Gloesener, a conduit au même but.

Nous avons déjà parlé de l'emploi de la terre comme conducteur. M. Steinheil, en 1837, ayant reconnu la possibilité de supprimer un des fils du circuit télégraphique ; les expériences faites depuis par M. Wheatstone, Matteucci (30), Breguet (31), et par les physiciens qui se sont occupés de télégraphie électrique, ont montré que dans le sol la conductibilité a lieu comme entre les deux électrodes très-petites plongées dans une masse liquide très-grande, et que dès lors on ne peut plus appliquer les lois de conductibilité relatives au diamètre et à la section. Cependant cette section étant très-grande, et même indéfinie, on peut considérer la résistance à la conductibilité de la terre comme nulle, c'est-à-dire que l'on peut admettre que le sol a une conductibilité parfaite. Il est probable, d'après toutes les recherches faites sur ce sujet, que la terre conduit les courants électriques par un mode d'action analogue à celui qui a lieu dans les fils métalliques et dans les liquides.

On a fait sur les lignes télégraphiques une observation que nous devons mentionner ici; elle est relative à l'existence de courants électriques qui circulent, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, en interposant un galvanomètre et en supprimant toute pile du circuit. Cet effet peut tenir à l'action de l'électricité atmosphérique, ou à des courants d'induction qui se manifestent dans ces fils par suite des variations dans l'intensité magnétique, suivant l'orientation des fils, ou bien à une action chimique produite sur les lames métalliques qui servent à mettre en relation l'extrémité des conducteurs avec le sol, ou bien encore à l'action de courants terrestres décrits par l'un de nous. (Voir page 174.)

On a vu que pour chaque télégraphe, entre deux stations, il fallait un fil conducteur, la terre servant de conducteur commun pour compléter le circuit; il en résulte qu'un système complet pour la transmission dans les deux sens n'exige que deux fils isolés. On est parvenu à modifier la construction des télégraphes de façon à n'employer qu'un seul fil isolé, lequel sert à faire fonctionner en même temps les deux récepteurs et les deux manipulateurs qui s'y trouvent établis. Ainsi l'on peut faire servir un seul fil à la transmission

de deux dépêches simultanément dans deux directions opposées, et indépendamment l'une de l'autre.

M. Gintl (32) est le premier qui ait résolu ce problème en appliquant la disposition qu'il a imaginée à un télégraphe électro-chimique. Il ne faut pas croire que par ce moyen deux courants puissent passer simultanément dans le même fil en sens contraire; mais par la disposition des appareils les deux télégraphes fonctionnent indépendamment l'un de l'autre. Plusieurs physiciens se sont occupés également de ce sujet après lui, et à l'Exposition universelle de 1855, on a pu voir fonctionner plusieurs télégraphes de Morse d'après le même principe que celui proposé par M. Gintl, quoique par des dispositions un peu différentes; nous citerons les appareils de MM. Siemens et Halske, Edlund, Wartmann.

Nous ne parlerons pas des accessoires des lignes télégraphiques, tels que les paratonnerres de MM. Breguet, Valker, Bianchi, Pouget, Maisonneuve et d'autres appareils en usage, dont la description nous entraînerait hors du cadre que nous nous sommes tracé.

§ V. *Horloges électriques, régulateurs, chronoscopes, électro-moteurs et appareils divers.*

L'emploi de l'électricité comme moyen télégraphique conduisit aussitôt à chercher si l'électricité ne pouvait pas être utilisée pour la transmission de signaux à des instants déterminés, c'est-à-dire pour faire fonctionner des appareils horaires ou pour régler et enregistrer des indications d'appareils ou d'instruments divers. Nous allons voir combien sont nombreuses les circonstances dans lesquelles son emploi a été invoqué; mais on ne doit pas oublier que ces applications très-diverses dérivent toutes de la télégraphie électrique, et de ce seul fait physique qu'un courant électrique dans un instant infiniment court et inappréciable autrement que par des observations très-précises, transmet un effet d'attraction ou de répulsion à une distance quelconque; ce principe, utilisé de mille manières par la mécanique, a conduit à toutes les applications qui en ont été faites, et dont nous ne citerons que les principales.

Une des premières questions qui aient préoccupé les ingénieurs depuis 1837 est celle de l'emploi de l'électricité pour l'horlogerie. Dans l'horlogerie électrique, on peut se proposer de résoudre deux questions : 1° construire des horloges électriques propre-

ment dites, dans lesquelles l'électricité fait fonction de force motrice; 2° faire marcher les appareils horaires ou compteurs chronométriques à l'aide d'un appareil type, et donnant l'heure simultanément dans un grand nombre de points différents.

La solution de la première question jusqu'ici n'a pas présenté d'avantages. M. Bain, en 1840, proposa un système d'horloge électrique; MM. Wheatstone, Paul Garnier, Froment, Vérité, Breguet, Robert Houdin, etc., ont adopté depuis différentes dispositions.

Les appareils horaires ou compteurs chonométriques ont été au contraire utilisés dans un grand nombre de circonstances. Supposons, en effet, que, dans un télégraphe à cadran, le manipulateur soit une horloge dont l'aiguille tourne de façon à interrompre et à rétablir le courant électrique toutes les minutes ou toutes les heures; alors l'aiguille du récepteur marchera de façon à indiquer les divisions du temps. Cette application est très-importante, puisque dans différents points, et même à une distance très-grande, on peut avoir des cadrans qui marquent simultanément la même heure; mais il en est de même pour ces instruments que pour les télégraphes électriques : chaque constructeur leur donne une disposition particulière pouvant atteindre également le but proposé. Nous citerons parmi les formes proposées les horloges électriques de M. Paul Garnier et celle de M. Breguet, en usage en France. Dans les observatoires, on peut aussi faire battre la seconde et avoir l'heure exacte dans les différens lieux d'observation, pourvu que l'horloge-type marche régulièrement. L'emploi de la télégraphie a également permis de déterminer avec une grande exactitude la différence entre les longitudes de plusieurs lieux.

L'électro-magnétisme a été appliqué, en outre, à la construction d'appareils très-divers : des régulateurs de lumière électrique ont été construits (voir page 249); des sonneries électriques ont pu être utilisées comme avertisseurs et comme télégraphes acoustiques; on a disposé un grand nombre d'enregistreurs électro-magnétiques; ces différents appareils ne sont en réalité que des télégraphes qui permettent de tracer des indications à des instants déterminés.

La rapidité de l'électricité étant très-grande par rapport à celle des corps qui se meuvent à la surface du globe (voir page 197), il est aisé de comprendre que l'on peut négliger sa vitesse de transmission dans un conducteur d'une étendue de quelques centaines de mètres, et, en lui faisant produire des effets physiques ou ma-

gnétiques, en différents points de la trajectoire d'un mobile, arriver ainsi à la détermination de la vitesse des projectiles, de celles de l'inflammation de la poudre, etc.; aussi l'artillerie a-t-elle un puissant auxiliaire dans l'électricité, qui permet d'étudier des questions intéressant à un haut degré le progrès de cette arme.

Les appareils construits dans le but de déterminer les intervalles de temps très-court ont reçu le nom de chronoscopes, ou mieux de chronomètres (33); ils offrent une grande diversité, tant sous le rapport de leur conception mécanique que sous celui du mécanisme au moyen duquel on emploie l'électricité.

M. Wheatstone paraît être le premier qui se soit occupé de ce sujet; il a imaginé, en 1840, un appareil pouvant servir à apprécier les intervalles de temps très-courts, et allant même jusqu'à la limite de $\frac{1}{7300}$ de seconde. Quelques années plus tard, en 1843, M. Breguet a construit pour M. Constantinoff un appareil composé d'un cylindre en cuivre tournant autour de son axe; sur ce cylindre venait appuyer un style porté par un chariot mobile portant des électro-aimants qui, pouvant agir sur le style, faisaient faire un trait sur le cylindre à des instants déterminés.

M. Pouillet a proposé d'utiliser la durée du passage d'un courant dans un multiplicateur, cette durée donnant une déviation plus ou moins grande à l'aiguille aimantée. MM. Navèz, Siemens, ont construit également des chronoscopes très-ingénieux. M. Martin de Brettes, capitaine d'artillerie française, a proposé plusieurs systèmes ingénieux pouvant servir à résoudre des questions relatives au mouvement des projectiles.

Aussitôt que l'on connut l'énorme puissance d'attraction produite par les électro-aimants, on songea à l'utiliser dans l'industrie pour construire des moteurs. Mais, si l'on est parvenu à obtenir des machines très-curieuses, on ne doit les considérer encore que comme machines d'essai, car la dépense de l'électricité pour obtenir une quantité de travail déterminée est bien supérieure à celle qui est nécessaire en employant les moteurs à vapeur.

M. Jacobi (34) paraît être le premier qui ait construit, vers 1834, un moteur électro-magnétique de quelque puissance; vers 1838, il put, en l'adaptant à une chaloupe contenant douze personnes, faire remonter la Néva à cette chaloupe; cette machine avait la force de trois quarts de cheval et était à rotation directe.

Depuis cette époque, on a varié beaucoup la forme des électromoteurs en les construisant à rotation directe ou oscillants, et

nous pouvons citer en France M. Froment comme ayant apporté de grandes améliorations à la construction de ces appareils; en outre, l'usage des piles à courant constant a rendu plus uniforme l'emploi de l'électricité, et il a été facile alors de comparer la dépense des piles avec la quantité de travail obtenu. Cette comparaison a été telle (35) que l'on a trouvé que les électro-moteurs actuels, même dans les meilleures conditions, usent au moins autant de zinc dans la pile qu'une machine à vapeur consomme de charbon pour obtenir la même force mécanique, c'est-à-dire exigent un minimum de deux kilogrammes de zinc par cheval et par heure. Si l'on joint à cette dépense celle des acides correspondants, on voit que le prix de revient de l'effet utile des moteurs électriques est bien supérieur à celui des autres moteurs. Mais ce n'est peut-être pas là le dernier mot de la science, et l'électricité a déjà réalisé tant de merveilles que l'on ne peut dire *à priori* que la construction d'électro-moteurs puissants et peu coûteux soit impossible; il faudrait néanmoins, pour que l'on puisse espérer résoudre cette question, connaître d'autres sources d'électricité que celles que l'on emploie aujourd'hui. On doit faire remarquer que, si l'on n'est pas parvenu à construire économiquement de puissantes machines, on a pu utiliser les électro-moteurs de peu de force pour faire tourner des tours, des métiers, surtout quand on a besoin de mouvements rapides.

Nous pouvons citer un grand nombre de circonstances dans lesquelles on a employé l'électricité, et notamment les effets des électro-aimants : tels sont les métiers électriques construits par M. Bonelli il y a quelques années; les freins de M. Nickles; les embrayeurs électro-magnétiques de M. Achard; les électro-trieurs de M. Chenot pour séparer les différentes parties des minerais de fer, etc.; mais, ces applications n'étant pas encore passées dans la pratique, nous nous bornons à les mentionner ici.

LISTE DES MÉMOIRES ET OUVRAGES CITÉS DANS LE CHAPITRE XII.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. II, p. 230.

(2) *Archives de l'électricité*, t. I, p. 26.

(3) Becquerel et E. Becquerel, *Traité d'électricité*, t. II, p. 276.

(4) Duport Saint-Clair, *Production des métaux précieux au Mexique*. Paris, 1843, p. 405.

(5) *Philosoph. Magazin.*, 1805, vol. XXI, p. 187.

(6) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. X, p. 578. — *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXXIII, p. 398. — *Archives de l'electricité*, *Genève*, t. I, p. 273.

(7) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, 1841, t. III, p. 998 et 1104. — *Archives de l'électricité*, t. II, p. 111.

(8) *Idem.*

(8') Roseleur, *Guide pratique du doreur*. Paris, 1855.

(9) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XVIII, p. 449.

(10) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXIV, p. 280.

(11) *Philosoph. Magazin.*, janvier 1840. — *Biblioth. univ. de Genève*, 3e série, t. XXVI, p. 197.

(12) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XVII, p. 1 et 53 ; t. XVIII, p. 197. — Becquerel et E. Becquerel, *Traité d'électricité*, t. II.

(13) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XIII, p. 342.

(14) *Athenæum*, mai 1839, n° LX, p. 334.

(15) *Philosophical Magasine*, octobre 1839.

(16) *Biblioth. univ. de Genève*, t. XXIII, p. 417 (1839).

(16') *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, nouv. série, t. IV, p. 745 (1857).

(17) *Scots Magazin.*, t. XV, p. 88 (1753). — *Journal le Cosmos*, 17 février 1854.

(18) L'abbé Moigno, *Traité de télégraphie électrique*. — Wail, *id.*

(19) *Relation du voyage d'A. Young en France*, t. I, p. 212.

(19') Ronalds, *Télégraphe électr.* — L'abbé Moigno, *Traité de l'électr.*, p. 62.

(20) *Annales de chim. et de phys.*, 2e série, t. XV, p. 72.

(21) *Publicat. scientifiq.*, Gœttingue 1835. — *Ann. de Schumacher*, 1836.

(22) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. VII, p. 590. — L'abbé Moigno, *Traité de télégraphie*, p. 80.

(23) *Journal of popular education* (mars 1837).

(24) *Mémoire de M. Quetelet, lu le* 10 *février* 1838 *à l'Académie de Bruxelles*.

(25) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. VII, p. 593. — Voir les *Traités de télégraphie* de MM. l'abbé Moigno, Waill, Lardner, Highton, Schellen, Dumoncel, etc.

(26) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. VII, p. 88 et 710.

(27) *Archives de l'électricité, Genève*, t. V, p. 574.

(28) *Comptes rendus de l'Acad. de Bruxelles*, 2e partie, t. VII, p. 131.

(29) Lardner, *The Museum of sciences et arts*, vol. IV, p. 213.

(30) *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut*, t. XVIII, p. 1082; t. XX, p. 1431 ; t. XXX, p. 774.

(31) Bréguet, *Traité de télégraphie électrique*.

(32) *Rapport de l'Exposition universelle de* 1855, t. I, p. 467.

(33) Martin de Brettes, *Études sur les appareils électro-magnétiques*. Paris, 1854, et *divers Mémoires relatifs au même sujet depuis* 1849.

(34) Becquerel, *Traité d'électricité*, t. VI, p. 100.

(35) *Rapport de l'Exposition universelle de* 1855, t. I, p. 461. — Becquerel et E. Becquerel, *Traité d'électricité*, t. III, p. 374. — *Annales de chim. et de phys.*, 3e série, t. XXXIV, p. 451.

CONCLUSION.

Dans ce résumé historique, qui doit précéder le *Traité d'électricité* en trois volumes que nous avons publié antérieurement, nous avons présenté le résumé des principales découvertes qui ont porté ces deux sciences à la hauteur où elles sont parvenues aujourd'hui, en nous attachant particulièrement à celles qui ont conduit à des lois et à des principes nouveaux.

Ces découvertes ont eu pour effet de rattacher à la physique la chimie et certains effets physiologiques, et d'expliquer un grand nombre de phénomènes naturels.

L'électricité, dans sa marche rapide, a reçu une impulsion extraordinaire depuis le commencement du siècle : à peine réduite à quelques effets dans le dix-septième siècle, dans le dix-huitième jusqu'en 1790, les propriétés générales de l'électricité statique ainsi que les lois des phénomènes ont été découvertes. De 1790 à 1800, le galvanisme et la pile ont imprimé une impulsion extraordinaire aux sciences physico-chimiques.

De 1800 à 1820, les propriétés chimiques et calorifiques des courants électriques ont été étudiées et étendues. De 1820 à 1830 la découverte de l'électro-magnétisme et de l'électro-dynamique, en rattachant les phénomènes magnétiques à l'électricité, a eu pour conséquences de fournir les moyens de trouver les lois du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, lois qui ont conduit aux piles à courants constants.

De 1830 à 1840, les phénomènes d'induction furent découverts; l'application des métaux en couches minces et la galvanoplastie commencèrent à se substituer aux anciens procédés industriels; la télégraphie électrique, digne auxiliaire des voies ferrées, fut un exemple d'une application immédiate des phénomènes les plus remarquables de l'électricité pour l'extension des relations internationales et des besoins commerciaux.

Depuis 1840 l'impulsion donnée ne s'est pas ralentie, et non seulement les lois des phénomènes ont été étendues, mais encore les effets observés ont conduit à des découvertes qui éclairent la constitution moléculaire des corps, tout en montrant dans combien de circonstances les sciences et l'industrie peuvent invoquer le concours de l'agent merveilleux qui a été l'objet d'une étude aussi persévérante.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

CHAP. VII. *Dégagement de l'électricité, principalement depuis* 1820 *jusqu'à l'époque actuelle.*

CHAP. VIII. *Propagation de l'électricité, et piles voltaïques, depuis* 1820 *jusqu'à l'époque actuelle.*

Chap. IX. *Électro-chimie depuis* 1820 *jusqu'à l'époque actuelle.*

Chap. X. *Effets mécaniques et physiques dus à l'électricité, principalement depuis* 1820 *jusqu'à l'époque actuelle.*

Chap. XI. *Action physiologique de l'électricité ; son emploi thérapeutique, principalement depuis* 1820 *jusqu'à l'époque actuelle.*

CHAP. XII. *Applications diverses de l'électricité aux arts.*

ERRATA ET OMISSIONS.

Page 4, ligne 1 : Gilbert publia vers le milieu du dix-septième siècle, *lisez* au commencement du dix-septième siècle (en 1600.)

Page 4, ligne 15 : Otto de Guerick vit la lumière électrique quoique faible. (Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 16.)

Page 4, ligne avant-dernière : Hauksbee. *Au lieu de* au manchon de résine, *lisez* au globe de résine. Boze ensuite se servit de globes de verre. (Priestley, t. I, p. 130.)

Page 5, ligne 16 : Les dénominations de positives et de négatives sont dues à Watson et à Franklin en 1747 (Priestley, *Histoire de l'électricité*, t. I, p. 344, et t. II, p. 483).—La théorie des deux fluides est due à Symmer. (Mémoires de 1759, vol. LI, des *Transactions philosophiques*, Priestley, t. II, p. 49.)

Page 5, ligne 22 : Dufay tira la première étincelle de l'homme placé sur un tabouret isolant, *lisez* de l'homme isolé en le suspendant à des cordons de soie, mode d'isolement employé par Gray pour montrer la conductibilité du corps humain. (Priestley, t. I, p. 66.)

Page 5, ligne 33 : Machine électrique... On ne s'était servi que de globes en soufre, en résine ou en verre, ou plus rarement d'un cylindre de verre, jusqu'à Ramsden. C'est ce constructeur qui, vers 1761 ou 1762, construisit le premier une machine électrique à plateau de verre ; depuis, cette forme a été adoptée. (Priestley, t. III, p. 91.)

Page 5, ligne 36 : Cuneus de Leyde ou Muschenbroeck (on ignore lequel des deux) découvrit la bouteille de Leyde. (Voir, pour la discussion qui a eu lieu à cette occasion, les *Mémoires de l'Académie des sciences de Paris*, 1746, t. LXIV, p. 1 des Mémoires.)

Page 12, ligne 14 : C'est Smeaton, Bevis et Franklin qui ont construit des condensateurs sous forme de carreaux magiques. (*Œuvres de Franklin*, traduction française, t. I, p. 28.)

Page 12, ligne 30 : Électrophore. Wilke, professeur de physique à Stockholm, imagina l'électrophore en 1762 ; Volta lui donna la forme actuelle. — (*Scripta Academ. suec. scientiarum, an.* 1762. *Journal de physique*, 1780, partie I, p. 17.)

Page 14, ligne 35 : D'où résulte l'acide nitrique, *il faut ajouter* en présence de l'eau (car il se forme directement des vapeurs nitreuses).

Page 17, ligne 32 : *Au lieu de* § V, *lisez* § VI.

Page 18, ligne 31 . *Au lieu de* § VI, *lisez* § VII.

Page 20, ligne 11 : Ou si l'on considère, *lisez* si l'on considère.

Page 21, ligne 31 : Au n° 25[1], *Mémoires de l'Académie des sciences, ajoutez* pour 1749, tome LXVII, p. 7.

Page 22, ligne 3 : T. III, p. 182, *lisez* t. III, p. 282.

Page 24, ligne 36 : Volta, déjà célèbre par la découverte de l'électrophore, *lisez* par le perfectionnement de l'électrophore découvert par Wilke.

Page 37, ligne 18 : L'humidité, *lisez* l'humidité hygroscopique.

Page 42, ligne 22 : *Lisez* telles que celles produites par la compression.

Page 60, ligne 29 : *Au lieu de* Nicolao Cabeo, *lisez* N. Cabeus de Ferrare.

Page 60, ligne 37 : *Idem.*

Page 61, lignes 4 et 16 : *Idem.*

Page 65, ligne 4 : Les armatures des aimants étaient connues du temps de Gilbert ; mais la forme actuelle a été adoptée dans le siècle dernier.

Page 69, ligne 25 : *Au lieu de* 629, *lisez* 1629.

Page 78, ligne 20 : *Au lieu de* Jocobi, *lisez* Jacobi.

Page 79, ligne 2 : *Au lieu de* parallèles, *lisez* perpendiculaires.

Page 80, ligne 10 : La boussole des tangentes a été décrite pour la première fois par M. Pouillet, en 1828, dans la première édition de son *Traité de physique.*

Page 103, ligne 3 . M. Pouillet a montré le premier que le cobalt perd la faculté d'être vivement attiré par l'aimant au rouge blanc, et le nickel vers 350° environ. (Pouillet, *Traité de physique*, 4e édit., t. I, p. 485.)

Page 105, ligne 16 : *Au lieu de* l'effet produit au contact, *lisez* l'effort nécessaire pour détruire le contact.

Page 124, ligne 31 : *Au lieu de* peu considérable, *lisez* un peu considérable.

Page 130, ligne 31 : *Au lieu de* qu'ils présentent, *lisez* qu'elle présente.

Page 148, ligne 17 : *Au lieu de* que le gaz, *lisez* que l'air.

Page 153, ligne 13 : C'est Hanksbée qui a observé les premiers effets d'électrisation des matières fondues. (Hauksbée, 2e édit., t. I, p. 347.)

Page 161, ligne 14 : *Au lieu de* variations, *lisez* écarts.

Page 177, ligne 13 : *Au lieu de* d'une cuisse, *lisez* d'une cuisse coupée en deux.

Page 178, ligne 23 : *Au lieu de* de, *lisez* ne.

Page 187, ligne 27 : Ohm en 1826 s'est occupé également de la détermination de la conductibilité électrique. (*Journal de physique* de Schweigger.)

Page 189, ligne 16 : *Au lieu de* trop grandes, *lisez* trop petites.

